

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 機械知能システム学専攻 博士前期課程		
氏 名	四役 勝輝	学籍番号	1832115
論 文 題 目	路面特徴量の抽出機能を加えた作業計画ナビゲーションの高度化 ～緑化領域抽出機能の開発～		
<p>要 旨</p> <p>近年,少子高齢化の進展により,人間の作業や補助を行うサービスロボットの開発が進んでいる.本研究でも,複合商業施設(以下,RSC)内外で案内や荷物の運搬を行う移動サービスロボットの開発に取り組んでいる. RSC のように,人間が共存する環境で作業を行うロボットには屋内外に渡りロボット周辺の環境を認識する機能が必要不可欠である.その為,本研究でも,これまでに屋内外に渡りロボットが走行するのに危険な領域(障害物,陥没箇所等)を認識する機能を開発し,一定の成果を収めた.そこで,次の段階として走行路周辺が花壇や低い草木,落葉溜りで構成される場合を想定した認識機能の開発を行うことにした.一般的に,花壇には走行路との間に段差がある為,容易に区別が付く.一方で,走行路と緑地(低い草木)が地続きである場合には,簡単に区別できず,このような不整地にロボットが侵入するとタイヤが取られ,走行不能になる可能性がある.また,秋～冬には走行路に落葉溜りが発生し,ロボットが乗り上げる事で,車輪が滑りオドメトリにズレが生じる.オドメトリのズレはロボットの自己位置の精度低下につながり,安定した走行が困難となる.その為,特に路面と地続きの芝生領域と植生領域,路面上の落葉溜り(以下,まとめて緑化領域)の認識機能は重要である.</p> <p>そこで本研究では, 1) 低計算コスト, 2) 低い誤認識率, 3) 植物特有の色の変化に頑強, などの要求仕様を満たす緑化領域抽出機能を提案し, それを実装した作業計画ナビゲーションシステムの開発を目的とする. 本論文では, 提案する緑化領域抽出機能の概要, 製作した移動ロボット及びシステムの構成, 提案手法の有用性を評価するための屋外走行実験及び評価について述べている.</p> <p>本論文の成果は以下の通りである.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 本研究で設定した赤外青植生指標と既存の植生指標である RBI を組み合わせた方法 A,及び近赤外波長帯域の輝度値分布を使用した方法 B を組み合わせ,“低計算コスト・低い誤認識率・植物特有の色変化に頑強”といった要求仕様を満たす RSC に適した緑化領域抽出手法を提案した 2) 開発した機能と 2D-LRF による情報を反映した局所地図を生成, 緑化領域を避ける経路を生成することを確認した 3) 屋外走行実験による RSC を想定した様々な事物がある環境で走行を行い, 本研究の提案するシステムの有用性を示した 			

令和元年度 修士論文

路面特徴量の抽出機能を加えた作業計画 ナビゲーションの高度化 ～緑化領域抽出機能の開発～

電気通信大学 情報理工学研究科
機械知能システム学専攻 金森研究室
1832115 四役 勝輝

主指導教員 金森 哉吏 准教授

副指導教員 青山 尚之 教授

提出日 2020 年 2 月 27 日

目次

第1章 諸元.....	1
1.1 背景	1
1.1.1 移動ロボットのサービスロボットの背景	1
1.1.2 複合商業施設における移動サービスロボットの必要性.....	4
1.1.3 これまでの研究内容.....	5
1.1.4 これまでの研究に対する本研究の立ち位置	6
1.2 関連研究.....	8
1.3 提案機能の要求仕様と本研究の目的	8
1.4 本研究のアプローチ.....	9
1.5 本論文の構成.....	9
第2章 緑化領域抽出機能.....	10
2.1 緑化領域抽出機能の概要	10
2.2 方法 A:植生指標識別法	11
2.2.1 植物の分光反射率と植生指標について	12
2.2.2 RSC における緑化領域の抽出に適した植生指標.....	13
2.2.3 本研究で使用を検討する植生指標.....	13
2.2.4 植生指標を用いたグレースケール画像の取得	15
2.2.5 植生指標の評価方法.....	17
2.2.6 植生指標を用いた緑化領域候補の抽出	19
2.3 方法 B:緑化領域を撮影し得られる輝度値の分布を用いる方法.....	20
2.3.1 緑化領域を撮影して得られる輝度値分布の特徴について	20
2.3.2 緑化領域候補の抽出方法	21
2.3.3 緑化領域候補の判断方法	22
2.4 GPU を用いた並列処理による高速化.....	27
第3章 自律移動ロボット”KANACO”の構成	28
3.1 ハードウェア構成	28
3.1.1 車体構成	28
3.2 搭載センサ	33
3.3 ソフトウェア構成	40
3.3.1 ソフトウェアの基本構成	40
3.3.2 ROS (Robot Operation System)	41
3.3.3 自己位置推定機能	43

3.3.4 大域的経路生成機能.....	43
3.3.5 局所的経路生成機能.....	44
3.3.6 大域的経路生成機能.....	44
3.3.7 局所的地図生成機能.....	45
第4章 予備実験	48
4.1 植生指標の検討(方法 A).....	48
4.2 緑化領域候補抽出に用いる閾値の決定(方法 A)	49
4.3 緑化領域候補抽出に用いる輝度値の取りうる範囲の決定(方法 B)	50
4.4 緑化領域候補の統合.....	51
第5章 実験.....	53
5.1 緑化領域抽出機能の性能評価	53
5.1.1 認識率・誤認識率	53
5.1.2 緑化領域抽出機能の平均処理速度.....	64
5.2 屋外走行実験.....	65
5.2.1 大域的地図作成	65
5.2.2 屋外走行	66
第6章 まとめ	73
6.1 結言	73
6.2 今後の課題	73
参考文献.....	74
謝辞	76

第1章 諸元

1.1 背景

1.1.1 に示すような社会背景を受け,本研究室はこれまでに複合商業施設施設を対象とした移動ロボットに関する研究を行ってきた. 1.1.2 では複合商業施設を対象とする理由, 1.1.3 ではこれまでに本研究室で行った研究内容, 1.1.4 では本研究の立ち位置について述べる.

1.1.1 移動ロボットのサービスロボットの背景

近年,日本では図 1.1 のように少子高齢化が急速に進展している[1].それに伴い今後深刻な労働力不足が懸念されており,総務省統計局の労働力調査年報[2]による調べでは,今後 50 年で労働力人口は現在より 4 割減少する見通しである.この問題を解決する為,最近では様々な産業でロボットの導入がされている.特にサービス産業は多くの人手を要するため,人間の作業の代行や補助を行うサービスロボットの需要が今後高まることが予想される.事実,経済産業省・NEDO によるロボット産業将来市場調査では,図 1.2 に示すようにサービスロボットの需要が今後 20 年で 10 倍以上に高まることが予想されている[3]. こうした市場動向から,各企業や大学,研究機関において,人間に代わって仕事を行う自律移動型サービスロボットの開発が盛んに研究されている(図 1.3~1.6).

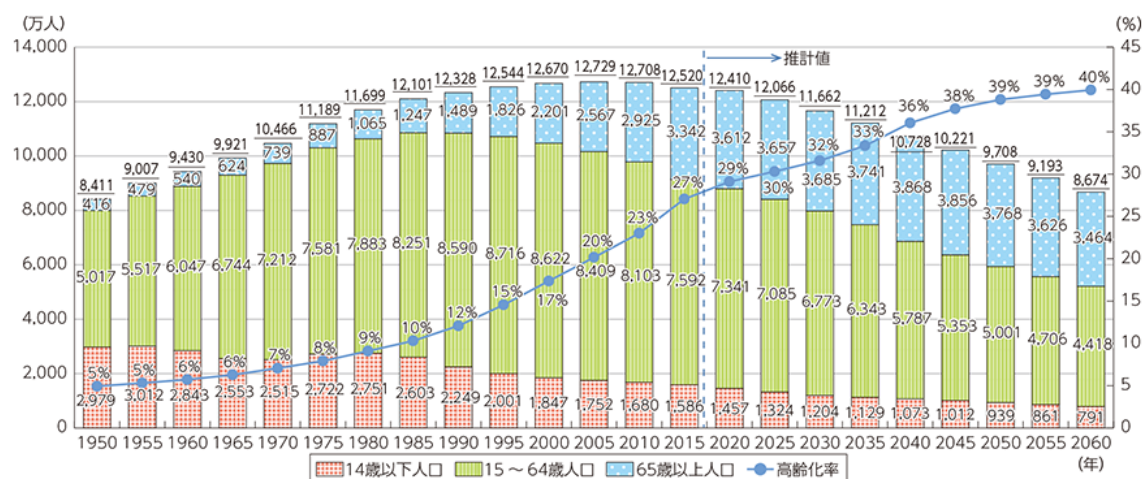


図 1.1 我が国の人口の推移[1]

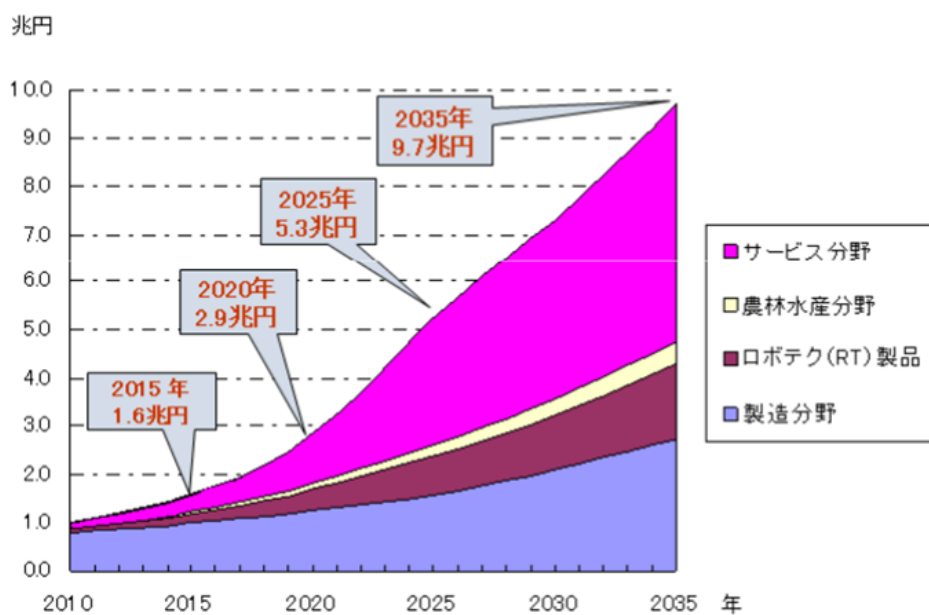


図 1.2 2035 年までのロボット産業の将来市場予測[3]



図 1.3 RS26 Powered by BrainOS
(ソフトバンクロボティクス) [4]



図 1.4 ROBOLUTION 01(左)
ROBOLUTION 02(右)
(株式会社ロボリユーション) [5]

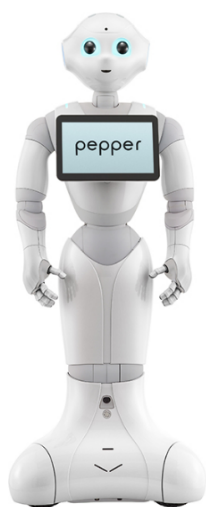


図 1.5 Pepper (SoftBank) [6]



図 1.6 Siriusbot (都産技研) [7]

1.1.2 複合商業施設における移動サービスロボットの必要性

日本におけるショッピングセンターは年々大型化しており,最近は店舗面積 4 万 m²以上,半径 8~25km 程度の広域を基本商圈とするリージョナル型ショッピングセンター(以後, RSC と呼ぶ)が大手企業によって続々と開業されている.例えば,ららぽーとを運営する三井不動産商業マネジメントは, 2018 年に「ららぽーと名古屋」(愛知県名古屋市), 2019 年に「三井ショッピングパークららぽーと沼津」(静岡県沼津市) など新たに 4 カ所の RSC を新設した.また,イオン傘下のイオンモールも, 2018 年に 4 カ所, 2019 年に 3 カ所の RSC を新設した.今後も,ショッピングを含む様々なアクティビティを一度に楽しめるという利便性から,RSC は年々増えていくことが予想されるが,それに伴い様々な問題が発生すると考えられる.例えば,敷地面積の増加に伴うテナント店の増加や目的地までの道のりの繁雑化により,現在位置や目的地までの経路がわからない人の増加,荷物の運搬が困難な人の増加,などが挙げられる.また,人手不足やそれに伴うサービスの質の低下は,敷地面積の増大に伴い,より深刻さが増していくと考えられる.その為,現在 RSC には重労働な荷物の運搬や屋内外の案内や誘導を行える移動ロボットが求められている.そこで,本研究では RSC において,屋内外に渡りサービス対象者にサービスを提供しながら自律走行を行う移動サービスロボットの実現を目指す.ここでのサービスは,サービス対象者とインタラクションを行いながら道案内や誘導,荷物の運搬を想定しており,RSC 抱える問題解決に寄与する.

1.1.3 これまでの研究内容

ロボットが人の手を借りずに作業を行うためには,ロボット自身で認識・判断・行動をすることが求められ,その実現のために様々な機能が必要になる.基本的な機能として,自己位置推定機能や大域的経路生成機能,局所的経路生成機能,大域地図生成機能,局所地図生成機能などが挙げられる. 図 1.7 は RSC のイメージである.特に RSC など人間が共存する環境で作業を行うロボットには,前述した基本的な機能に加えて,歩行者認識機能やロボットが本来の走行経路か否かを判断する機能など,屋内外に渡りロボット周辺の環境を認識する機能(以下,周辺環境認識機能)が重要である.その為,本研究室では,これまでに屋内外に渡って走行が安全な領域と危険な領域(壁,障害物,勾配が高い路面,陥没箇所)とに区別する認識機能の開発を行い一定の成果を取めた[8,9].



図 1.7 RSC(大型複合商業施設)のイメージ

1.1.4 これまでの研究に対する本研究の立ち位置

本研究室では 1.1.3 で述べたように屋内外で障害物や段差などを認識する周辺環境認識機能の開発を行い一定の成果を収めた。そこで、次の段階として走行路周辺が花壇や低い草木、落葉溜まりで構成される領域を想定した認識機能の開発を行う。花壇には一般的に走行路との間に段差があり、容易に区別が付くが、走行路と緑地(低い草木)が地続きである場合には簡単に区別できず、このような不整地にロボットが侵入するとタイヤが取られ、移動ロボットが走行不能になる可能性がある。また、秋から冬の時期には走行路面上に落葉溜まりが発生し、ロボットが乗り上げる事で車輪が滑りオドメトリのズレが生じる。オドメトリにズレが生じるとロボットの自己位置が上手く推定できず目的地までの走行が困難になるなど問題が生じる。その為、走行路周辺が緑地で構成される場合や走行路面上に落葉溜まりが存在する場合には、緑地や落葉溜まりを認識する機能は特に重要である。そこで、本研究では想定する領域の中でも、RSC に多く存在する芝生領域や植生領域、路面上の落葉溜まりを抽出する機能の開発を行う。図 1.8~図 1.10 は抽出を行う対象の例である。

多くの RSC では緑化への取り組みを行っている。その為、芝生や植生、広葉樹などを植えて管理を行っている。落葉溜まりは広葉樹から落ちる枯葉が集まって形成されたものである。そこで、本研究では、芝生領域や植生領域、落葉溜まりをまとめて緑化領域と呼ぶ。



図 1.8 走行路と地つづきな芝生領域



図 1.9 走行路にはみ出す植生領域

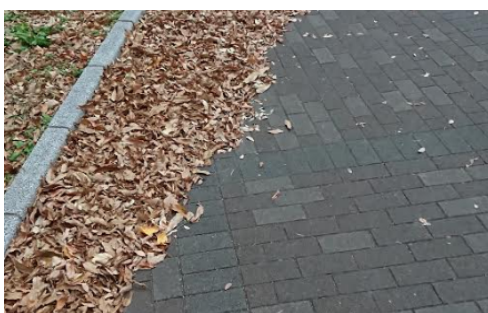


図 1.10 走行路面上の落葉溜まり

1.2 関連研究

ロボットの走行路周辺の芝生や植生領域を抽出する手法として、大きく機械学習を用いた手法と植物の光学的特性を利用した手法が提案されている。松崎ら[10]は事前に画像上の事物を道や芝生といったカテゴリに分類し識別器を作成する事で、芝生や走行路などの分類を行っている。しかし、数百枚の画像に対して人手でカテゴリ分類を行わなければならない、事前の準備に大きな手間を要する。加えて、事前に分類したカテゴリの特徴量と分類を行う事物の特徴量を比較しながら分類を行う為、計算コストが高くリアルタイム性が求められる自立移動ロボットの環境認識には適さない。M.wurm[11]らはSVMを用いて走行路と植生領域の分類を行っているが事前の学習に手間を要し、計算コストが高い。伊達ら[12]は植生とアスファルトの赤外線反射率に差がある事を利用し、植生領域を抽出する為の閾値を設定する事で分類を行っている。しかし、植生領域以外にも植生領域と同程度の赤外線を反射する事物が存在する為、多種多様な事物が存在する RSCでの使用には適さない。

1.3 提案機能の要求仕様と本研究の目的

提案する緑化領域抽出機能の要求仕様は、

- ① 低計算コスト
- ② 低い誤認識率
- ③ 植物特有の色の変化に頑強

と設定する。要求仕様①は移動ロボットにはリアルタイム性が求められる為、要求仕様②は走行路面上の誤認識は移動ロボットの適切な経路生成に大きな影響を及ぼす事に加えて、RSCには緑化領域に似た色や性質を持つ事物が存在する為、要求仕様③は移動ロボットが季節を問わず作業を行う為、設定した。

本研究は設定した要求仕様を満たす緑化領域抽出機能の提案、及びそれを実装した作業計画ナビゲーションシステムの高度化を目的とし、移動サービスロボットの能力向上に寄与する。

1.4 本研究のアプローチ

緑化領域を抽出する為,本研究では画像入力装置を用いて画像情報(カラー画像・赤外線画像)を取得する.取得した画像情報を基に,緑化領域である可能性の候補(以下,緑化領域候補)を2種類の方法を用いて抽出し,それらを統合する事で緑化領域の抽出を行う.緑化領域候補の抽出方法は第2章に後述する.また,画像入力装置から緑化領域までの距離情報をナビゲーション機能に反映する事で作業計画ナビゲーションの高度化を行う.

1.5 本論文の構成

本論文は6つの章から構成される.本章では,背景,関連研究,要求仕様と本研究の目的,本研究のアプローチについて述べた.第2章では,提案した緑化領域抽出機能について述べる.第3章では,使用した自律移動ロボットのハードウェア構成,ソフトウェア構成,走行戦略について述べる.第4章は抽出機能の予備実験,第5章は提案機能の評価及び,提案機能の有用性を評価する為の屋外走行実験について述べる.第6章は本論文のまとめである.

第2章 緑化領域抽出機能

2.1 緑化領域抽出機能の概要

本研究では,RGB-D カメラより得られる画像情報(カラー・赤外線)を基に 2 通りの方法で,緑化領域候補の抽出を行い,それらを統合する事で緑化領域を抽出する.緑化領域候補を抽出する方法は,方法 A:植生指標識別法,方法 B:輝度値分布識別法である.方法 B に関しては,計算コストを抑える為に GPU を用いた並列処理を導入し,提案機能全体の高速化を図った.提案機能の構成を図 2.1 に示す.

2.2 節では,方法 A に関して,2.3 節では方法 B に関して,2.4 節では GPU を用いた並列処理による高速化,について詳しく述べていく.

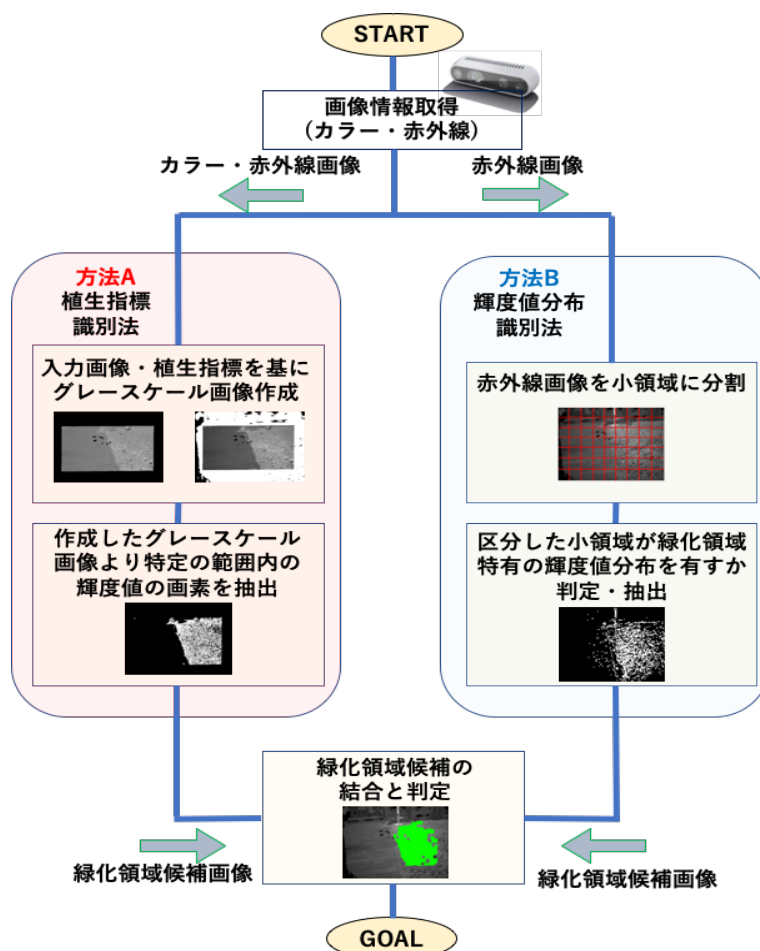


図 2.1 緑化領域抽出機能の構成

2.2 方法 A:植生指標識別法

植物は特徴的な分光反射率を有し,植物の活性化具合の調査[13]など,場面に応じて様々な植生指標が提案されてきた.そこで,本研究ではこれらの植生指標から RSC で移動ロボットが緑化領域を抽出する為に最適な植生指標を検討し,緑化領域候補の抽出に用いる.2.2.1~2.2.6 で詳しく述べる.

2.2.1 植物の分光反射率と植生指標について

植物は季節の移り変わりにより色が変化する。これは、植物内に含まれるクロロフィルやカロテノイド、アントシアニン等の分子による現象である。クロロフィルは植物が光合成に必要な分子で短波長と長波長を吸収し、中波長を反射する性質を持つ為、緑色に見える。一方、時間が経つとクロロフィルは分解されてカロテノイドと呼ばれる分子が植物内で目立つようになる。カロテノイドは短波長を吸収し、中波長と長波長を反射するので黄色に見える。紅葉する植物はアントシアニンが多く含まれる。アントシアニンは長波長のみを強く反射するので赤色に見える。図 2.2 に例として、水穂の葉と稲穂の分光反射率の測定結果[14]を示す。また、図 2.2 でも見て取れるように植物は近赤外線付近の波長を強く返す。これは植物の細胞構造によるもので、この特性は「レッドエッジ」とも呼ばれる。

今日までに、これらの植物特有の特徴を生かし、植物の活性化具合の調査[13]やリモートセンシング[15]など、場面に応じて様々な植生指標が提案されてきた。植生指標とは、植物特有の分光反射率を生かし、簡易な計算式を用いて植生の状況を把握する為の指標である。

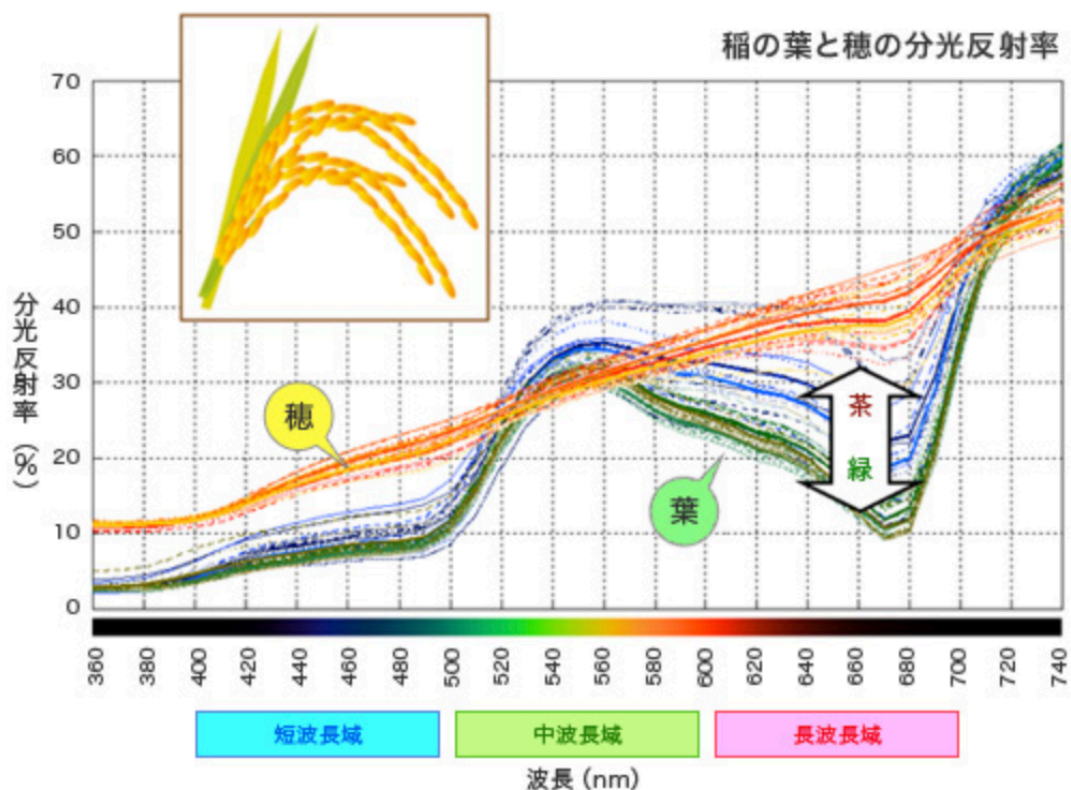


図 2.2 水穂の葉と稲穂の分光反射率[14]

2.2.2 RSCにおける緑化領域の抽出に適した植生指標

緑化領域は季節の移り変わりにより、緑色から黄色、茶色に変化する状況、緑色や黄色の芝生・植生が混在する状況、などがある。また、RSC など建物が多く物陰が出来やすい環境では、緑化領域が影で覆われる状況も考えられる。その為、RSC で緑化領域を抽出する機能には、緑化領域の色の変化に関わらず、走行路と緑化領域を分離する事。影領域に覆われる緑化領域か否かに関わらず緑化領域を抽出する事が求められる。そこで、本研究では、複数の植生指標の中から RSC に最も適した植生指標を決定し緑化領域候補の抽出に使用する。植生指標の評価方法に関しては 2.2.3 及び 2.2.4 で述べる。

2.2.3 本研究で使用する植生指標

今回、植生指標は尾崎の研究[16,17,18]を参考に選択した 4 つの植生指標及び、2.2.1 で述べた植物の特徴より、緑化領域は色変化に関わらず、短波長帯域と近赤外波長帯域の波長を多く反射する性質を考慮し、式(5)のように設定した植生指標を比較・評価に用いる。また、植生指標ではないが、事前に撮影した緑化領域と同じ色の事物を抽出する方法も緑化領域候補の抽出に使用できるか、同様に比較・評価する。以下に本研究で比較・評価する植生指標を紹介する。

■NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)

定義式を式(1)に示す。1970 年頃から、最も用いられており、実質標準的な植生指標である。植物の葉の顕著な特徴である近赤外域の反射率を用いている。加えて、クロロフィルとの相関が高いことが知られている。これは、葉の細胞構造により近赤外域の反射率を多く反射する一方で、クロロフィルは長波長域の反射率を吸収する性質によるものである。

$$NDVI = \frac{INF - R}{INF + R} \quad (1)$$

INF : 近赤外域の反射率 R : 長波長域(可視光赤)の反射率

■GRvi(Green Red vegetation index)

定義式を式(2)に示す.中波長域(可視光緑)の反射率と長波長域(可視光赤)から算出される植生指標で,植物の葉の季節による移り変わり(落葉)時期の検出に有効であることが知られる.

$$GRvi = \frac{G - R}{G + R} \quad (2)$$

G : 中波長域(可視光緑)の反射率 R : 長波長域(可視光赤)の反射率

■GEI(Green Excess Index)

定義式を式(3)に示す.2007 年頃から広まってきた GEI は可視光域(可視光青・可視光緑・可視光赤)の反射率を使用する植生指標である.「RGB 指標」や「2G_RBi」の名称で呼ばれることもある.GEI の分子項を $(G-R)+(G-B)$ と変換出来ることからわかるように,クロロフィルの短波長域と長波長域を吸収する性質を強調した植生指標となる.

$$GEI = \frac{2G - R - B}{G + R + B} \quad (3)$$

G : 中波長域(可視光緑)の反射率 R : 長波長域(可視光赤)の反射率
 B : 短波長域(可視光青)の反射率

■RBI(Red Blue Index)

定義式を式(4)に示す.尾崎によって提案された植生指標で,長波超域(可視光赤)と短波長域(可視光青)の反射率を使用する.人工芝のような非植生緑色物体と自然の植生の識別に用いることが可能である.

$$RBI = \frac{R - B}{R + B} \quad (4)$$

R : 長波長域(可視光赤)の反射率 B : 短波長域(可視光青)の反射率

■赤外青植生指標

2.2.1 で示した植物の特徴を考慮して設定した植生指標(以下,赤外青植生指標と呼称)である.定義式を式(5)に示す.植物の色が変化する要因となるクロロフィル・カロテノイド・アントシアニンはいずれも短波長域(可視光青)を吸収する事.近赤外域の反射率の高さは葉の細胞構造によるものである為,季節によらず不変である事.を考慮し,これらの特徴を強調するように設定した.これにより,季節による色の変化に左右されず安定した緑化領域の抽出を期待する.

$$\text{赤外青植生指標} = \frac{INF - B}{INF + B} \quad (5)$$

INF : 近赤外域の反射率 B : 短波長域(可視光青)の反射率

2.2.4 植生指標を用いたグレースケール画像の取得

本研究では,2.2.3 で述べた植生指標を基にグレースケール画像を作成する.グレースケール画像は植生指標毎に作成し,2.2.5~2.2.6 で述べる植生指標の評価及び,方法 A における緑化領域候補の抽出に用いる.図 2.5~図 2.9 は植生指標毎に作成したグレースケール画像で,図 2.4 のカラー画像及び,同時に撮影した赤外線画像が基になった.作成したグレースケール画像は RGB-D カメラから得られたカラー画像,赤外線画像内の同一の座標から得られた輝度値を植生指標に代入し,0~255 に正規化した値を用いている.また,グレースケール画像は明るい領域ほど植生指標から得られた値が大きい.植生指標の計算には一般的に反射率が使用されるが,本研究では RGB-D カメラから得られる輝度値を代用している.その為,近赤外域の反射率には赤外線画像から得られる輝度値を使用,短波長域の反射率にはカラー画像の青成分の輝度値を使用,中波長域の反射率にはカラー画像の緑成分の輝度値を使用,長波長域の反射率にはカラー画像の赤成分の輝度値を使用している.

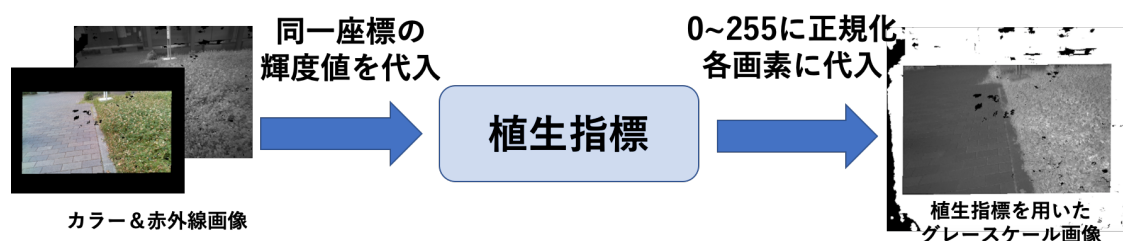


図 2.3 植生指標を用いたグレースケール画像の作成イメージ

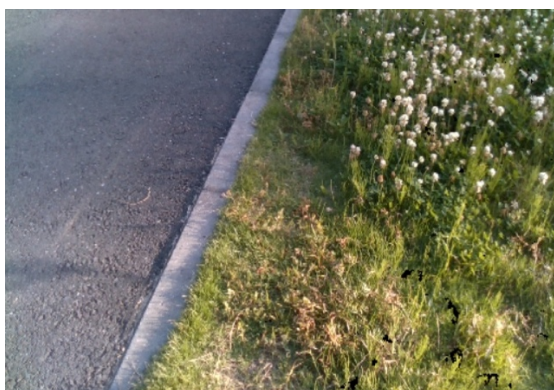


図 2.4 カラー画像

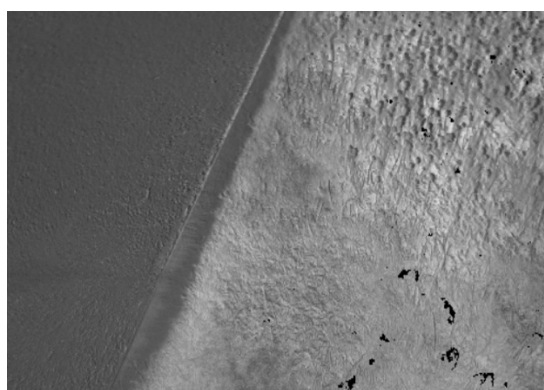


図 2.5 グレースケール画像(NDVI)

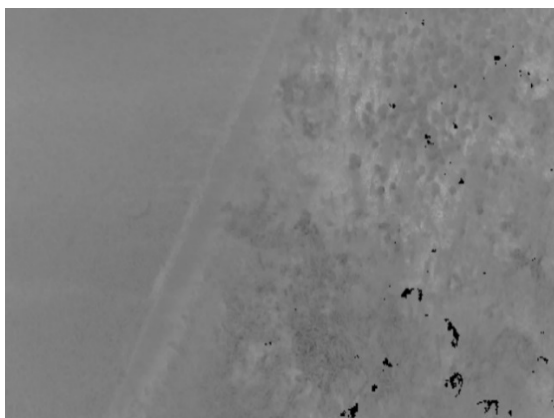


図 2.6 グレースケール画像(GRvi)

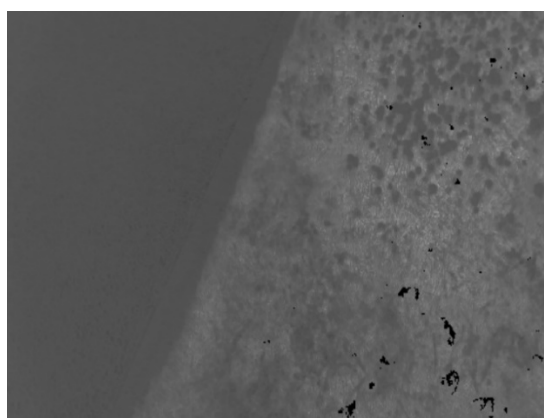


図 2.7 グレースケール画像(GEI)

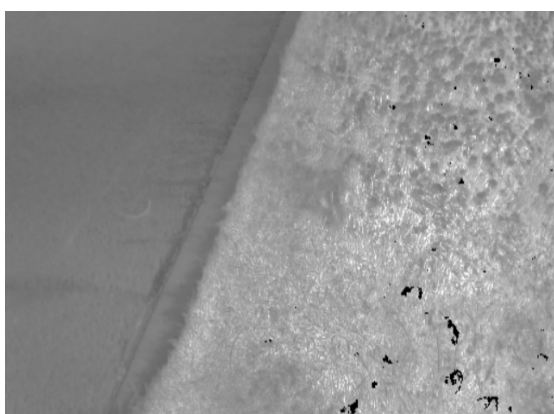


図 2.8 グレースケール画像(RBI)

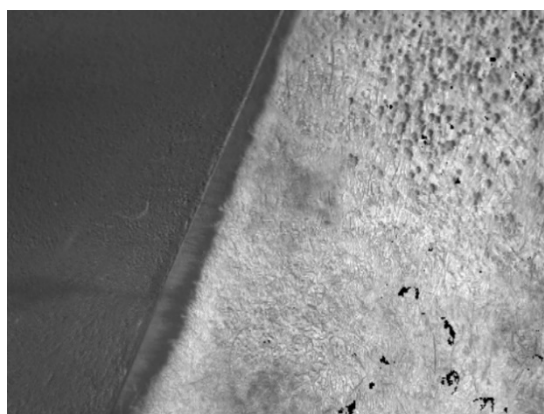


図 2.9 グレースケール画像(赤外青植生指標)

2.2.5 植生指標の評価方法

植生指標を比較・検討する為に、黄色の緑化領域とアスファルト、緑の緑化領域とアスファルト、落葉溜りとアスファルトを撮影した画像(カラー・赤外線)を使用する。これらは、本研究の抽出対象である、色の変化する芝生・植生および落葉溜りを想定した画像である。実際に使用した画像を図 2.10 から図 2.12 に示す。

2.2.2 で述べたように RSC で緑化領域を抽出する為には、植物特有の色の変化に頑強か、緑化領域が影におおわれるか否かで認識性能に影響が無いか、が求められる。そこで、2 つの評価基準を設け、植生指標の評価を行い緑化領域候補の抽出に用いる植生指標を決定する。

まず、植物の色の変化に頑強か、について述べる。図 2.10~図 2.12 それぞれで緑化領域とアスファルトが容易に分離できるか否か評価を行い、その評価結果を基に植生指標を検討した。以下、図 2.10 を例に評価方法を説明する。植生指標毎に作成したグレースケール画像上で、図 2.10 の色線で囲まれた領域と同じ領域を切り出す。切り出した領域は緑化領域とアスファルト領域の 2 通りがあり、陽が当たる領域を切り出すように設定している。その後、切り出した領域より、緑化領域のヒストグラムとアスファルトのヒストグラムを作成し、最大値が 1 になるように正規化を行う。2 つのヒストグラムが類似するほど分離が難しい。そこで、類似度を求め類似度が低いかな否かで植物の色が変化しても容易に分離が行えるか評価した。

次に緑化領域が影に覆われる領域かな否かで認識性能に影響が無いか、について比較・検討を行う。図 2.10~図 2.12 それぞれで、影の有無による影響について評価を行い、その評価結果を基に植生性能を検討する。以下、図 2.10 を例に評価方法を説明する。植生指標毎に作成したグレースケール画像上で図 2.10 の青色垂直線と同じ座標上の輝度値を測定した。青色垂直線は影と陽の当たる領域を跨ぐように設定されており、上方向から下方向に 100 画素測定している。青色垂直中央の赤点は 50 画素目を示す。影と日向の境目を除く、0~40 と 60~100 の輝度値の平均を取り、差を比較した。差が大きい程、影の有無による影響が大きい植生指標である。

これらの評価方法の結果、及び本研究で用いる植生指標は 4.1.1 で述べる。

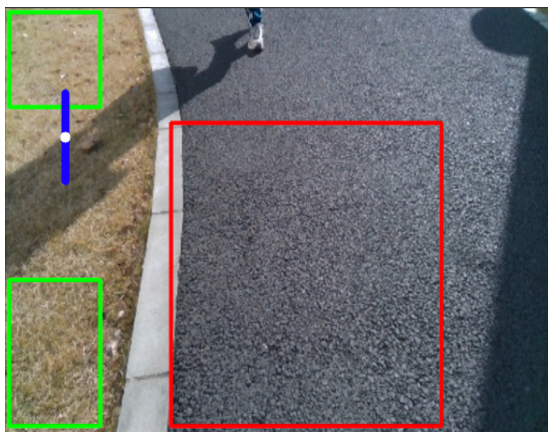


図 2.10 黄色の緑化領域とアスファルト



図 2.11 緑色の緑化領域とアスファルト

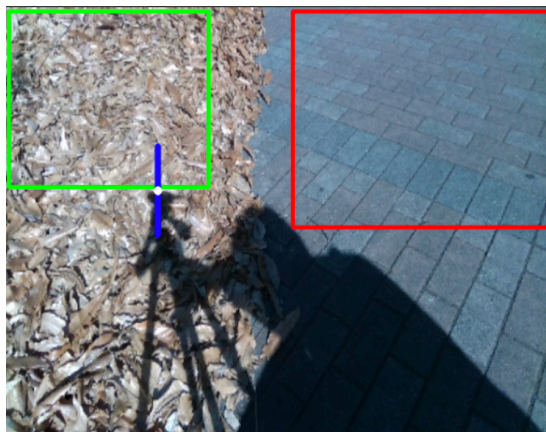


図 2.12 茶色の緑化領域とアスファルト

2.2.6 植生指標を用いた緑化領域候補の抽出

2.2.5 で述べた評価方法より用いる植生指標を決定した。この評価指標を用いて緑化領域候補を抽出する。具体的には、事前の測定より緑化領域を抽出する為の上限・下限閾値を決定、植生指標を用いて得られたグレースケール画像上の各画素の輝度値が、この上限・下限閾値に収まっているかチェックをかけていき、収まっていればその画素を緑化領域候補として抽出していった。次に上限・下限閾値の決定方法を述べる。本研究では、黄色の緑化領域、緑色の緑化領域、茶色の緑化領域を撮影した画像をそれぞれ複数枚ずつ用意する。画像中の領域の影の有無は考慮しない。これら 3 パターンの領域の画像をそれぞれヒストグラムに変換、最大値が 1 になるように正規化する。この際、ヒストグラムが一峰性であるか考慮した。多峰性の場合、緑化領域以外の事物が多く含まれている場合があるからである。そして、図 2.13 のように設定値以下をノイズとして除去、設定値に対応する輝度値の最小値と最大値を求めた。これを領域毎に用意した複数枚の画像全てに行い、最小値の平均、最大値の平均を取得。上限の閾値、下限の閾値は 3 つの領域それぞれで取得した最小値の平均を平均した値、最大値の平均を平均した値を基に決定している。

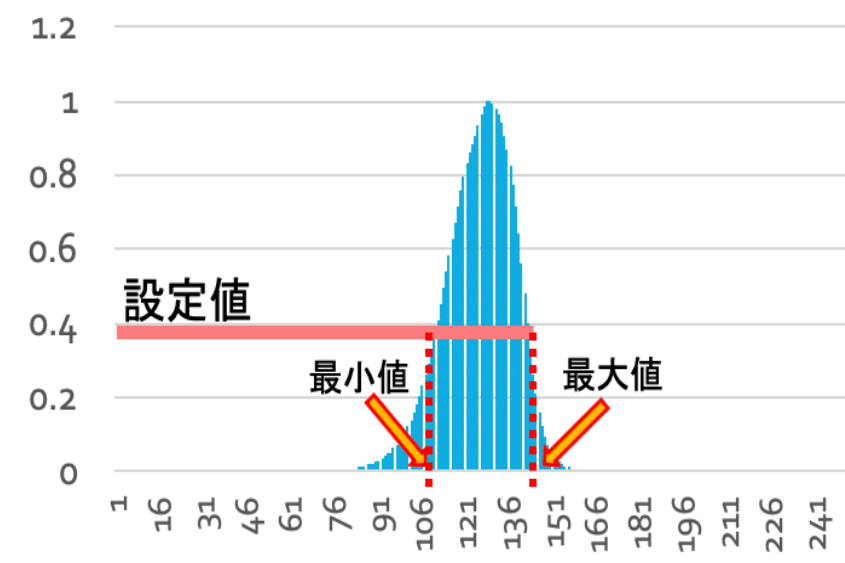


図 2.13 上限・下限閾値決定参考図

2.3 方法 B: 緑化領域を撮影し得られる輝度値の分布を用いる方法

緑化領域は撮影して得られる輝度値の分布に特徴がある.そこで,本研究ではこの特徴を利用し緑化領域候補の抽出に用いる.2.3.1~2.3.4 で詳しく述べる.

また、方法 B 以外の処理は CPU を用いた逐次処理だが、方法 B は画像全体を分割した小領域全体に対する処理のため、GPU を用いた分散処理を行い、システム全体を高速化した.詳しくは 2.4 で述べる.

2.3.1 緑化領域を撮影して得られる輝度値分布の特徴について

図 2.14 と図 2.15 は緑化領域を撮影し得られた赤外線画像の輝度値を距離毎にプロットした図である.緑点は緑化領域(芝生・植生),茶点は緑化領域(落葉溜り),赤点は走行路面上のアスファルトを測定した結果である.緑化領域は葉が傾き,重なりにより測定して得られる輝度値分布の分散が大きい.加えて,2.2.1 で述べたように植物の細胞構造により緑化領域は他の事物と比較して近赤外域の波長を強く反射する.以下に緑化領域を撮影して得られる輝度値分布の特徴をまとめる.

- ・ 緑化領域を測定した際に得られる輝度値分布の分散が大きい
- ・ 得られる輝度値は他の事物と比較して大きい傾向がある
- ・ 測定して得られる輝度値は毎回同じくらいの範囲内に収まる

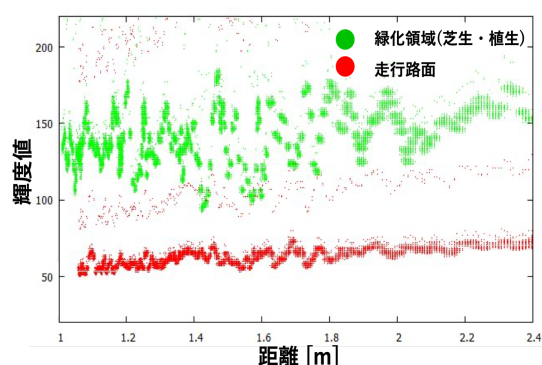


図 2.14 芝生・植生と走行路面の輝度値

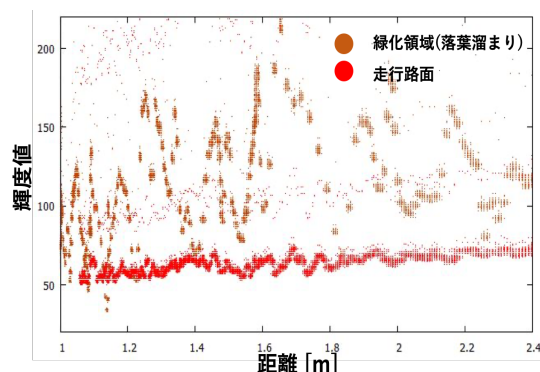


図 2.15 落葉溜りと走行路面の輝度値

2.3.2 緑化領域候補の抽出方法

方法 B では,緑化領域候補を抽出する為に赤外線画像を用いる.画像を図 2.16 のように分割し,その分割した小領域が, 2.3.1 で述べた特徴を有していればその小領域を緑化領域候補として抽出した.分割した小領域は 5×5 画素の正方形である.特徴を有しているか否かの判断は 2.3.3 で説明する

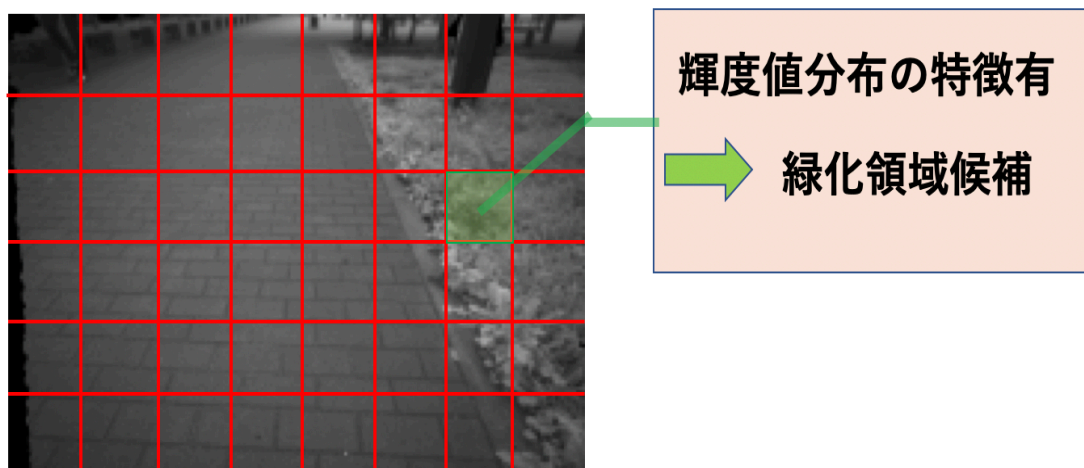


図 2.16 緑化領域候補の抽出イメージ

2.3.3 緑化領域候補の判断方法

分割した小領域の判断方法について説明する。2.3.1 で述べたように、小領域が緑化領域であれば、得られる輝度値は他の事物と比較して高く、輝度値分布の分散は大きい。その為、図 2.18 のような輝度値の分布が得られる。一方、小領域が緑化領域以外である場合は異なった輝度値分布が得られる。そこで、本研究では以下の処理を行い、小領域内の輝度値分布が緑化領域特有の輝度値分布(特定の輝度値範囲内で分散が大)か否か判断を行う。

まず、判断を行う為の前処理として、図 2.18 の赤線で示すような閾値を設定する。2 本の青線は、緑化領域から得られる、おおよその輝度値範囲を示しており、緑化領域の輝度値分布を事前に測定し決定した。赤線で示す閾値は緑化領域の取りうる最小の輝度値より低く設定する。図 2.19 は、横軸を設定した閾値、縦軸を小領域内に存在する設定した閾値より低い輝度値の画素数をカウントした図である。2 本の青線は図 2.18 の青線と対応関係にある。

判断を行う際は、図 2.17 のフローチャートに従い小領域内に存在する設定した閾値より低い輝度値の画素数をカウントし、図 2.19 のように記録、その後、閾値を+10 して更新、この処理を閾値が 250 になるまで繰り返す。図 2.18~図 2.27 はこの一連の処理を行った際の途中経過を示した図で、図 2.18、図 2.20、図 2.22、図 2.24 図 2.26 は閾値の更新する過程で、図 2.19、図 2.21、図 2.23、図 2.25、図 2.27 は閾値の更新結果を受けての閾値より低い輝度値の画素数をカウントした結果である。小領域の判断は、処理を終えた閾値より低い輝度値の画素数をカウントした結果の 2 本の青線間の縦軸の変化量の情報より行う。

処理を終えた結果の例を図 2.28~図 2.30 に示す。小領域が緑化領域だった場合、図 2.28 のように 2 本の青線間の縦軸の変化量は緩やかに上昇する。一方、緑化領域と異なる輝度値分布の場合は図 2.29 のように縦軸の変化量が全く変化しない、輝度値分布の分散が小さい場合は急激に縦軸が変化するといった特徴が得られる。そこで、前述の判断処理を行い、図 2.28 のような結果が得られた場合、その小領域を緑化領域候補として抽出した。

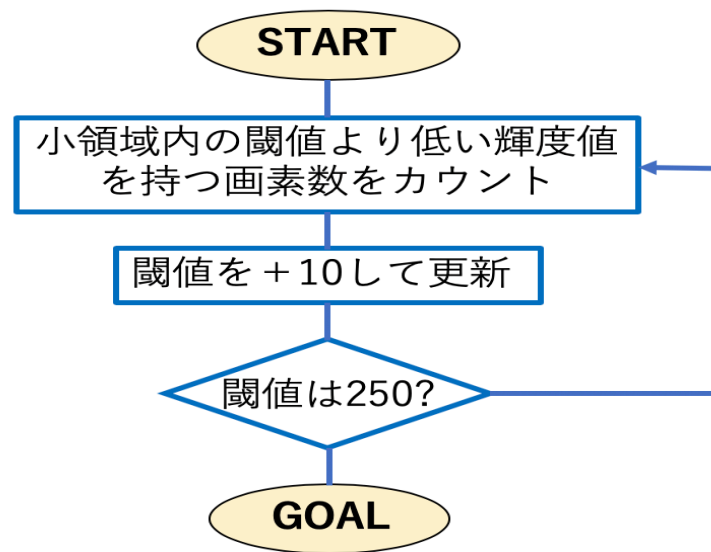


図 2.17 小領域判断フローチャート

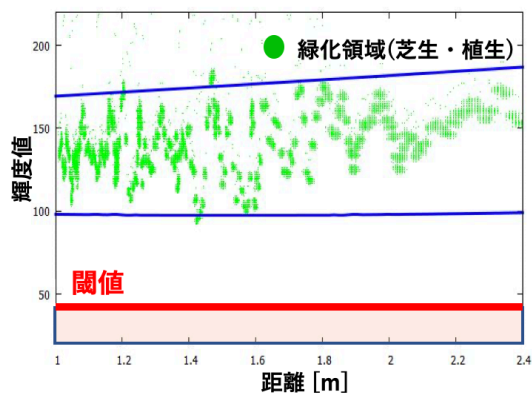


図 2.18 小領域の判断参考図(閾値=40)

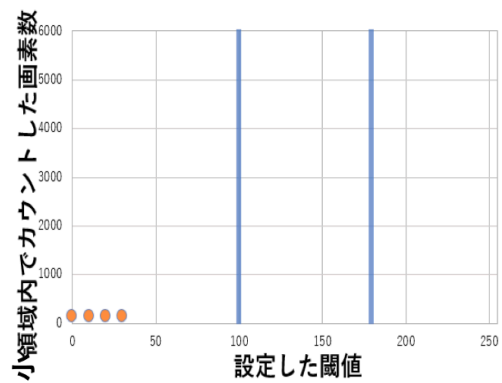


図 2.19 カウントした画素数(閾値=40)

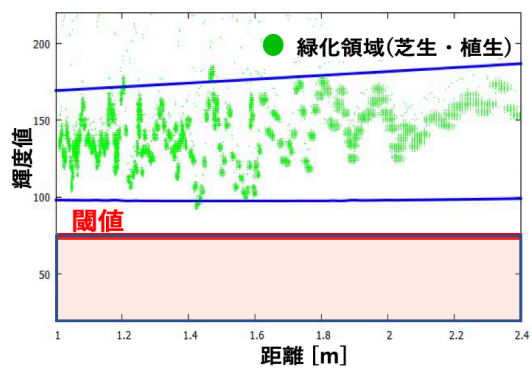


図 2.20 小領域の判断参考図(閾値=70)

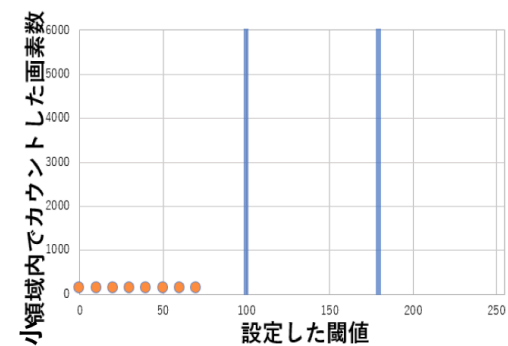


図 2.21 カウントした画素数(閾値=70)

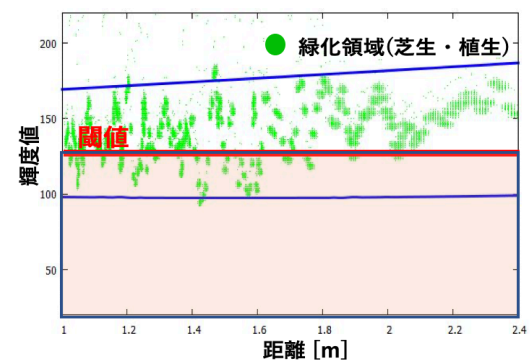


図 2.22 小領域の判断参考図(閾値=140)

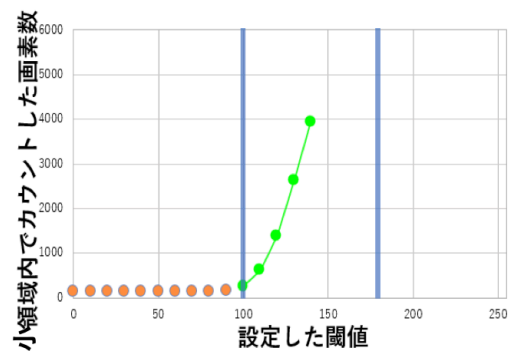


図 2.23 カウントした画素数(閾値=140)

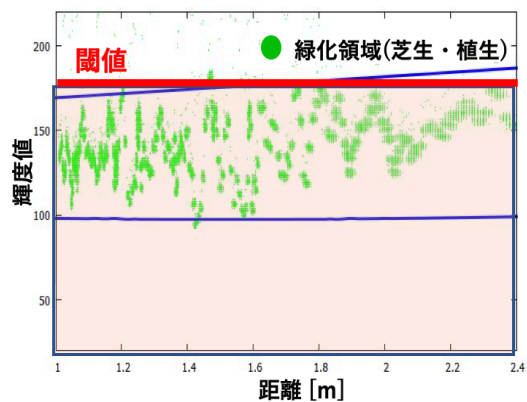


図 2.24 小領域の判断参考図(閾値=180)

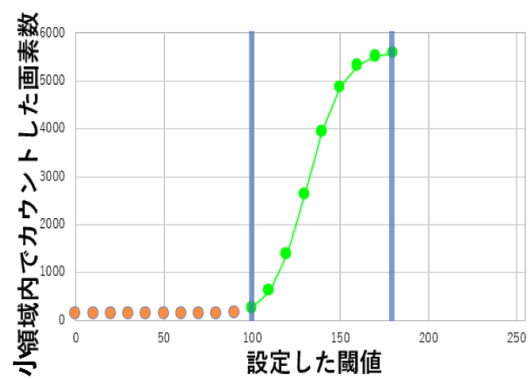


図 2.25 カウントした画素数(閾値=180)

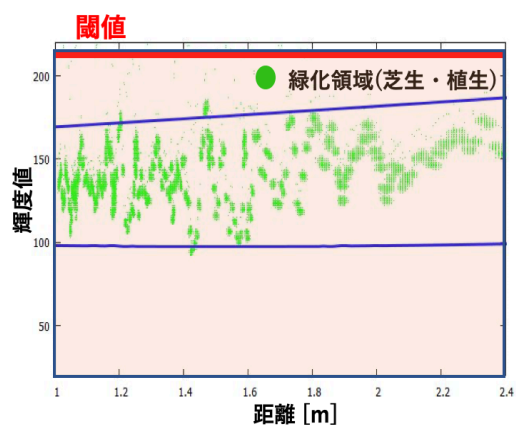


図 2.26 小領域の判断参考図(閾値=250)

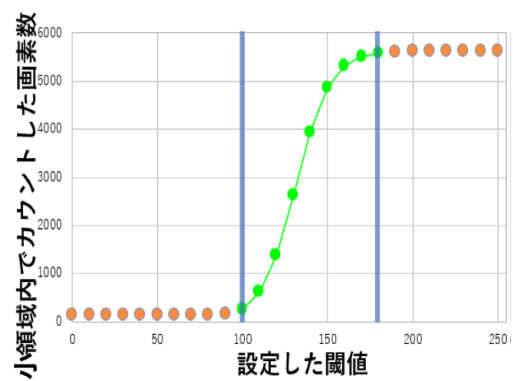


図 2.27 カウントした画素数(閾値=250)

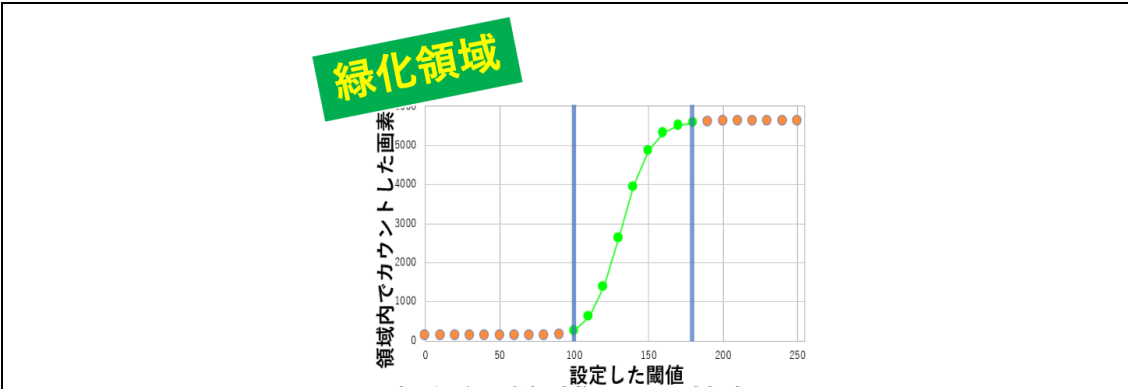


図 2.28 小領域の判断処理の結果(緑化領域)

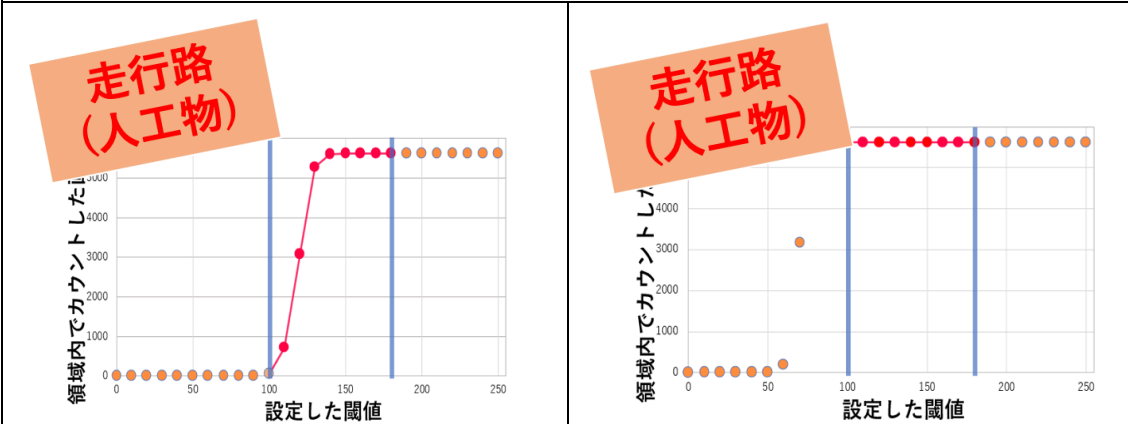


図 2.29 小領域の判断処理の結果(緑化領域以外 I)

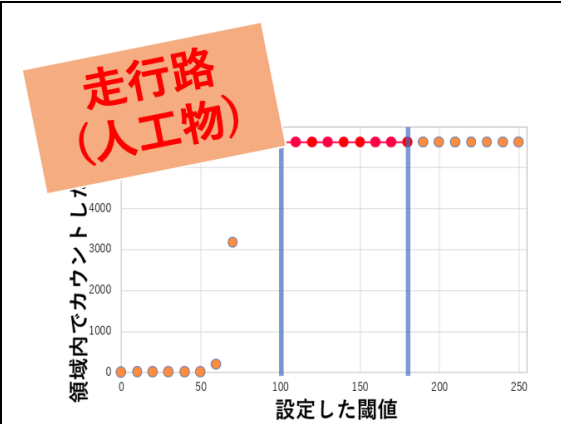


図 2.30 小領域の判断処理の結果(緑化領域以外 II)

2.4 GPU を用いた並列処理による高速化

移動ロボットのナビゲーションシステムには,様々な機能が互いに情報を受け渡ししながら,リアルタイムにロボット周辺の環境を認識し,判断・行動をとる必要がある.その実現のためには,各種機能の処理速度は低コストに抑えることが求められる.したがって,本研究で提案する機能においてもリアルタイム処理を実現する為,方法 B に GPU を用いた並列処理システムを構築し,小領域を並列に処理した.方法 B 以外の処理は CPU を用いた逐次処理によって処理されている.

表 2.1 に GPU の仕様を示す.GPU 統合開発環境として CUDA10 を使用した.各スレッドは,グローバルメモリにアクセスすることでデータの読み込みを行い,処理を行う.本研究では,並列処理を行うプログラム内のブロック数を(5,96),1 ブロック数あたりのスレッド数を(128,5)に設定し,分割した全 12288 の小領域を並列に処理し,緑化領域候補の抽出を行った.この並列処理を導入した事による方法 A 及び方法 B を組み合わせた緑化領域抽出機能の平均処理速度は 5.1.2 に後述する.

表 2.1 GeforceGTX1050Ti の仕様

Number of CUDA cores	768
Base clock (MHz)	1290
Memory clock (Gbps)	7
Amount of memory (GB)	4
Memory interface (bit)	128
Maximum bandwidth (GB/sec)	112

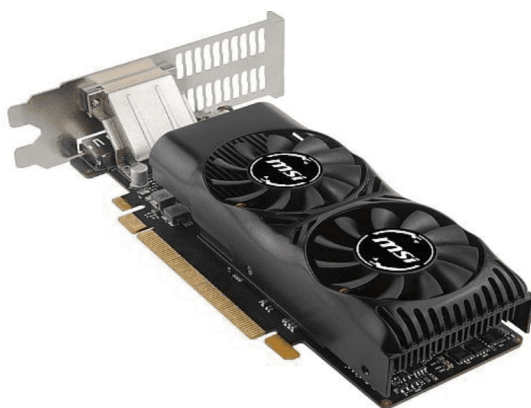


図 2.31 GeforceGTX1050Ti の外観

第3章 自律移動ロボット”KANACO”の構成

3.1 ハードウェア構成

3.1.1 車体構成

本研究で使用した自律移動ロボット”KANACO (Kanamori Autonomous Navigation And COmmunication robot)”の構成について述べる.自律移動ロボットの移動機構として,一般的な2輪型の他,4輪型やクローラー型,全方向移動型等,様々な方式があるが,本研究では,①低コスト,②高エネルギー効率,③狭い空間でも小回りが利くことから,独立2輪駆動型のロボットを採用した.自動ドアの溝や,アスファルトと側溝蓋の境目など,ロボットの走行領域に存在する小さな段差を乗り越えるために,前輪に車輪径 210mm のエアータイヤ2つ,後輪に車輪径 125mm のキャスターを2つ取り付けた.搭載したハードウェアは,PC,左右モータユニット,モータドライバ,制御回路,各種センサから構成される.表 3.1 にロボットの諸元を示す.

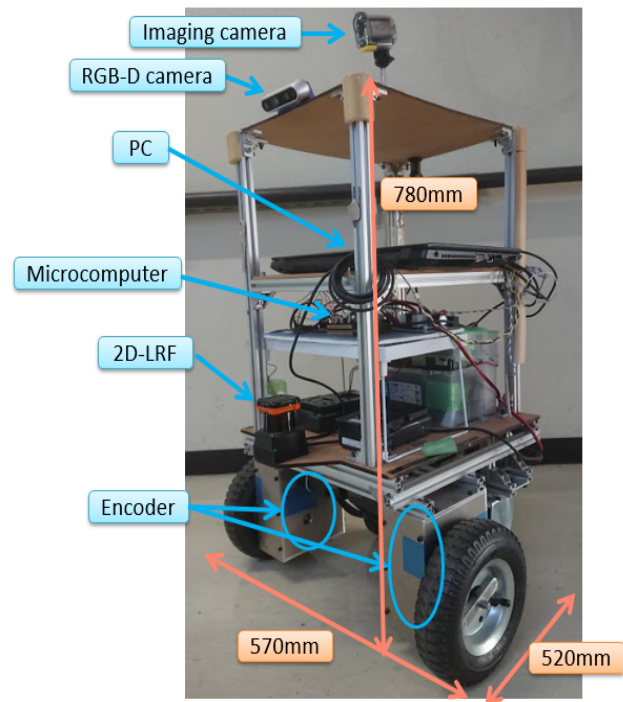


図 3.1 ロボットの外観と外寸

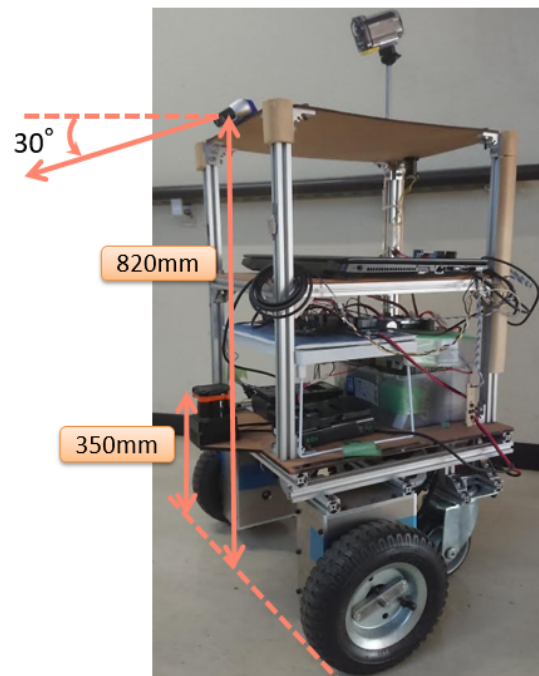


図 3.2 センサ設置高さと角度

表 3.1 ロボットの諸元

Size	W570mm × L520mm × H780mm
Weight	32kg (PC : 2.4kg)
Motor output	60W × 2axis
Drive system	Independent two-wheel drive (rear caster two wheels)
PC	Endeavor NJ6100E
Microcomputer	Nucleo (STM32F401RE)
Sensor	2DLRF : UTM-30LX (Hokuyo) RGB-D camera : RealsenseD435 (Intel) Encoder : B600G-D2R (Wakogiken)

■PC

PC には,EPSON 製の Endeavor NJ6100E を使用した.また,本研究では OS として Ubuntu14.04 を採用している.PC の仕様を表 3.2 に示す.

表 3.2 PC の仕様

MODEL	Endeavor NJ6100E
OS	Ubuntu14.04 64bit
CPU	Core i7-7700
GPU	Geforce GTX 1050 Ti specifications
MEMORY	32GB
HDD	500GB(HDD)

■モータユニット

モータユニットは,AC サーボモータ(ワコー技研 B600G-R2R),歯車減速機によって構成されている.AC サーボモータはレゾルバを備えている.

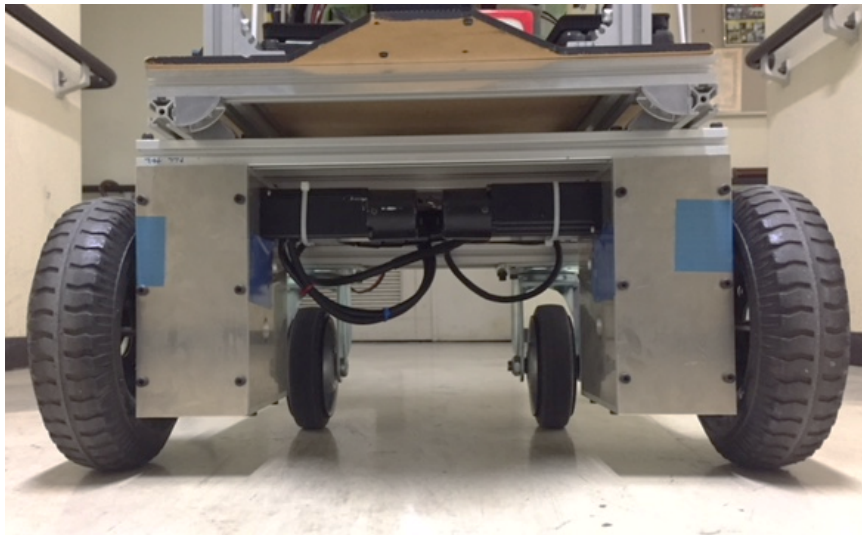


図 3.3 モータユニット

■モータドライバ

モータドライバは,ワコー技研 UMAR24 を2つ搭載している.

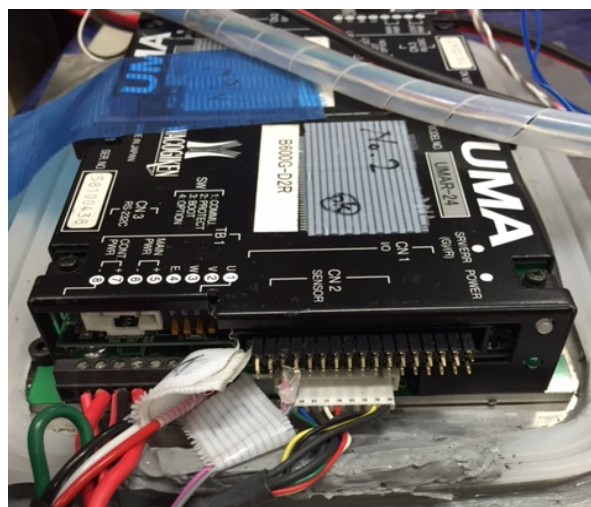


図 3.4 モータドライバ

■ バッテリーユニット

バッテリーユニットは、Li-ion バッテリー (IDX 社 E-7S) 2 つから成るコントロール電源と、シールドバッテリー (Kung Long 社 WP12-12) 2 つから成るモータ電源の 2 系統を出力する。安全装置として、非常停止ボタンがあり、これを押すことでモータへの電源を停止する。

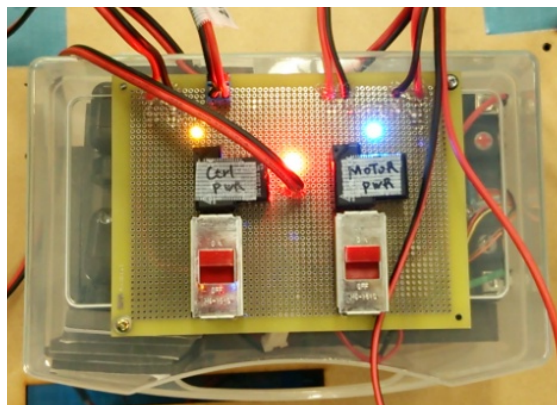


図 3.5 バッテリーユニット

■ 制御回路

制御回路は、マイコン (STM32nucleo) 1 台を搭載したマイコン基板、電源装置のコントロール電源を入力として、安定化した 24V と 5V を出力する DC/DC コンバータ基板、5V 信号と 24V 信号を変換するレベル変換基板から成る。

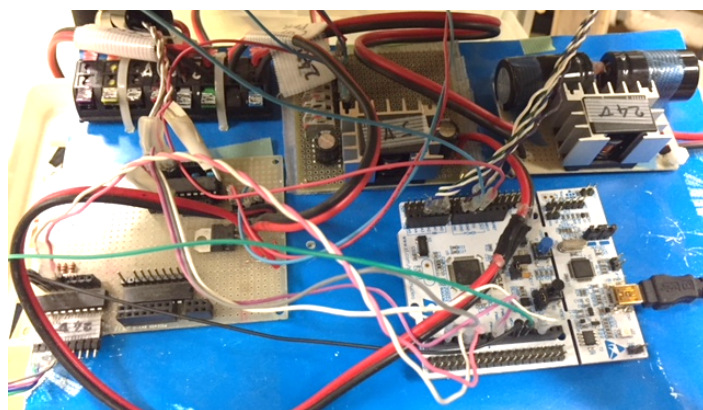


図 3.6 制御回路

3.2 搭載センサ

移動ロボットには、内界センサとして回転角センサ、外界センサとして2次元測域センサ、RGB-Dカメラを搭載している。

■回転角センサ

回転角センサとは、回転量を測定するための装置であり、NC 工作機械や産業用ロボットアームなどの大型機械から、プリンターやマウスのホイールまで幅広く、利用されている。種類として、主にロータリーエンコーダとレゾルバ式エンコーダに分類される。

ロータリーエンコーダは回転角を電気信号に変換するセンサ部分と、電気信号をデジタル信号に変換する回路部分により構成される。回転角の電気信号への変換方式には複数の方式があり、主に磁気式と光学式が挙げられ、精度が高いことが知られる。また、レゾルバ式エンコーダは回転角度を2層の交流電圧として出力する角度センサである。鉄心とコイルのみで構成されており（図3.7）、ロータリーエンコーダ等の他センサに比べ構造的に高い耐環境性を持つのが特徴である。

本研究で用いる移動ロボットは屋内外を走行するため、移動量を検知するための回転角センサには高い耐環境性を持つレゾルバ式エンコーダ(ワコー技研製)を使用した。レゾルバ式エンコーダは駆動モータに付属しており、出力された信号はモータドライバUMAR(ワコー技研製)を通し、エンコーダパルスに変換される。パルスの分解能は1024p/rであり、Nucleo ボードによりエンコーダ値を検出した。使用したレゾルバ式エンコーダの詳細な仕様については表3.3に示す通りである。

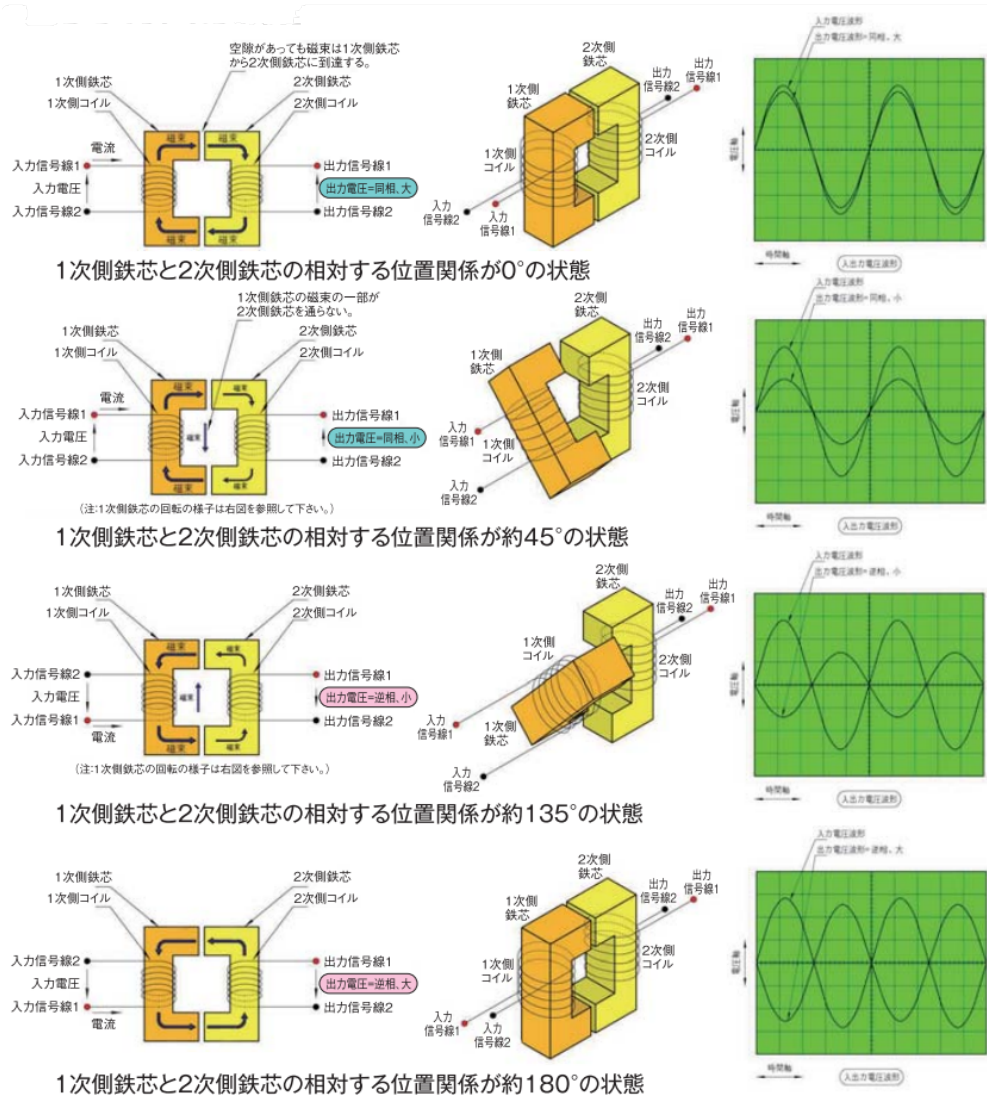


図 3.7 レゾルバの原理[19]

表 3.3 エンコーダパルス仕様

分解能	1024p/r
出力	直交 2 相
出力インターフェイス	TTL 出力
電源電圧	5V
電源電流	Max 40mA
最大応答周波数	100kHz
動作温度	-40℃~100℃
重量	57g

■2次元測域センサ

測域センサとは環境認識用の光走査式距離センサの総称である.測域センサの距離測定には位相差方式を用いている.位相差方式の概念図を図 3.8 に示す.投光波と受光波の位相差を ϕ [rad], 変調周波数を f [Hz], 光速を c [mm/s]とすると,

$$L = \frac{c}{4\pi f} \phi \quad (6)$$

で距離 L [mm]を求めることができる.

本研究では 2 次元測域センサである北陽電機株式会社製のスキャナ式レーザレンジファインダーセンサ UTM-30LX (図 3.9) を使用した.UTM-30LX は高速データ出力タイプのため,ロボットの高速走行に対応可能なほか,移動時に必要である環境認識を高精度,高分解能での検出が可能である.また,IEC 規格にて規定された IP64 の保護等級を持ち,屋外での使用に十分に耐えうる製品である.UTM-30LX の詳細な仕様は (表 3.4) の通りである.

電源には GensAce の LiPo(18.5V, 5000mAh, 45C)を用いて,DCDC コンバータ KID-1205A を用いたスイッチング電源キットで 12V に電圧を変換し,2D-LRF に電源供給を行った.また,移動ロボットには床面から 350mm の高さに設置した.

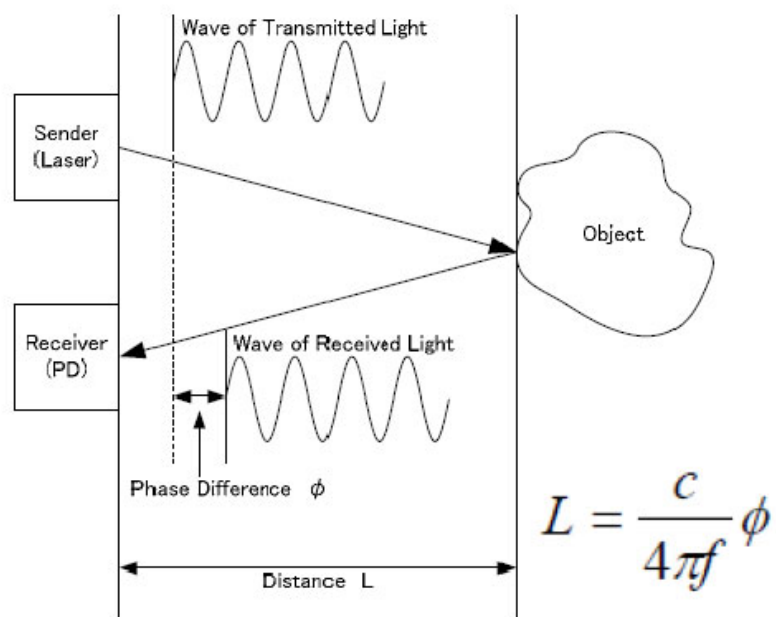


図 3.8 位相差方式の概念図[20]

表 3.4 2次元測域センサ仕様

型式	UTM-30LX
電源電圧	DC 12V
電源電流	0.7A
波長	905nm
測距範囲	0.1~30m
測距精度	0.1~10m:±30mm, 10~30m:±50
分解能	1mm
走査角度	270 度
角度分解能	0.25 度
重量	210g
外形寸法(W×D×H)	60mm×60mm×87mm
走査時間	25ms/scan



図 3.9 二次元測域センサ[21]



図 3.10 スイッチング電源キット

■RGB-D カメラ

周辺環境の画像入力装置として、複数の画像情報を一度に取得可能(距離・カラー・赤外線)な RealsenseD435 を使用する。RealsenseD435 は、2018 年初頭に Intel 社によってリリースされた RGB-D カメラである。本研究では、これまで Microsoft 社の KinectV2 を画像入力装置として使用してきたが、太陽光が直接当たる領域で距離情報が取得できないなど屋外での使用に問題があった。RealsenseD435 は屋内での使用に加えて、屋外での使用もサポートされている。図 3.11 に RealsenseD435 の外観、表 3.5 に動作仕様を示す。オープンソース及びプラットフォームである Intel® Realsense™ SDK 2.0 を使用する事で、開発環境である Linux Ubuntu 14.04 上で画像情報を取得する事が可能となる。加えて、画像上の座標のズレの補正や撮影した映像の保存などが可能となり研究の効率化に寄与した。



図 3.11 RealsenseD435 の外観

表 3.5 RealsenseD435 の動作仕様

項目	仕様
カラー画像	1920×1080
カラーフレームレート	30fps
距離・赤外線画像	1280×720
距離フレームレート	90fps
距離センシング方式	グローバルシャッター方式
距離情報認識範囲	0.2m~10.0m

3.3 ソフトウェア構成

3.3.1 ソフトウェアの基本構成

図 3.12 にシステム構成を示す.外界センサ部,PC 部,駆動部から構成される.PC 部及び駆動部の一部には,分散型処理システムを構築するために ROS (Robot Operation System) を導入した. ナビゲーション機能は,ROS のパッケージ navigation package で用意されている自己位置推定機能 (Adaptive Monte Carlo Localization) ,大域的経路生成機能 (Dijkstra's Algorithm) ,局所的経路生成機能 (Dynamic Window Approach) ,slam_gmapping package で用意されている大域的地図生成機能 (Rao-Blackwellized Particle Filter を用いた Grid based SLAM) ,これらに加えて本研究で開発した緑化領域抽出機能,局所的地図生成機能,から構成される.

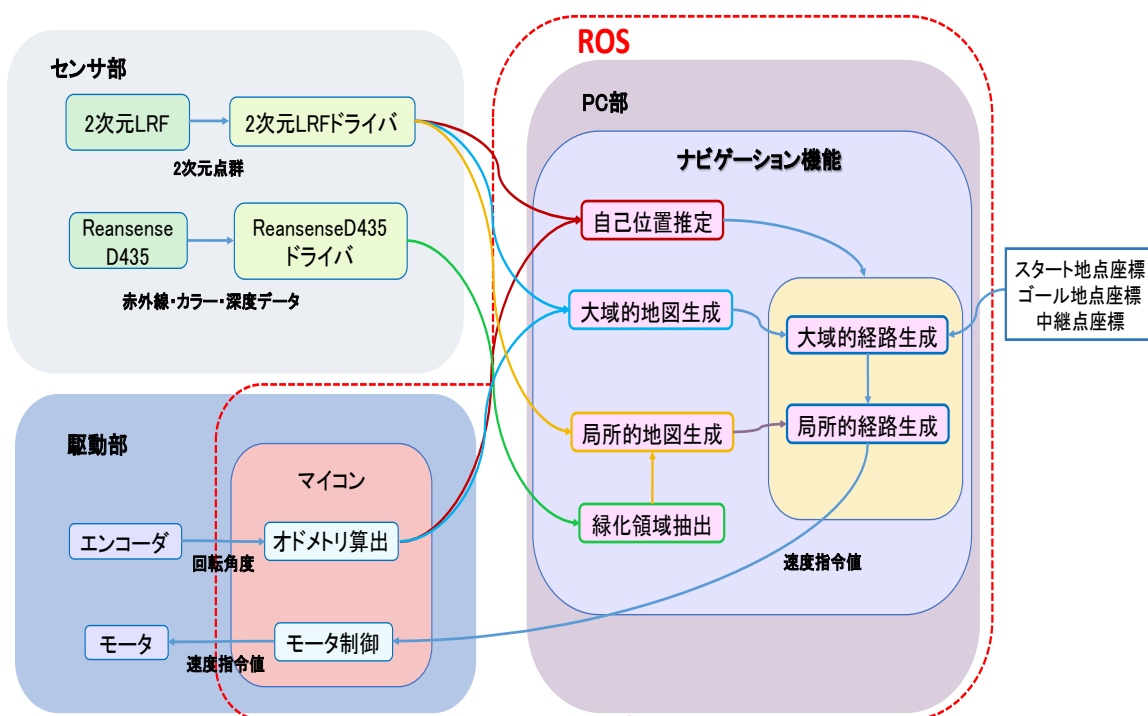


図 3.12 移動ロボットシステムブロック図

3.3.2 ROS (Robot Operation System)

ROS とは, Robot Operation System の略であり, ロボット開発で用いられる様々なセンサ, ロボット本体, アルゴリズムを統一的に利用するためのフレームワークである (図 3.13). 米国の Willow Garage 社により開発され, その後も OSRF (Open Source Robotics Foundation) によりメンテナンスされている. ROS の特徴として, 容易な並列分散処理の構築, 豊富なロボット用のツール/ライブラリ群, オープンソースの 3 つがある.

■容易な並列分散処理の構築

ROS では, 各種機能を有したソフトウェアをノードとして複数同時に実行し, それらのノードが互い受け渡しをするシステムになっている (図 3.14). そのため, 各ノードが分散しているため, ソフトウェアの再利用性が高く, 複数のノードを組み合わせることで, 容易にひとつの大きなシステムを構築することができる.

■豊富なツール/ライブラリ群

ロボットのソフトウェアは, 多くの機能を必要とするため複雑になりがちだが, ROS ではそれらを扱いやすくするために豊富なツールやライブラリ群を提供している. 例えば, データの可視化ツールやメッセージの記録・再生ツール, 物理シミュレータ, 座標変換ライブラリ等がある.

■オープンソース

ROS は基本的にはオープンソースであるため, 世界中の研究者・開発者が開発した様々なソースコードを利用できる. そのため, 既存の要素技術の構築にかかる時間を省けるため, 開発スピードを高めることができる.

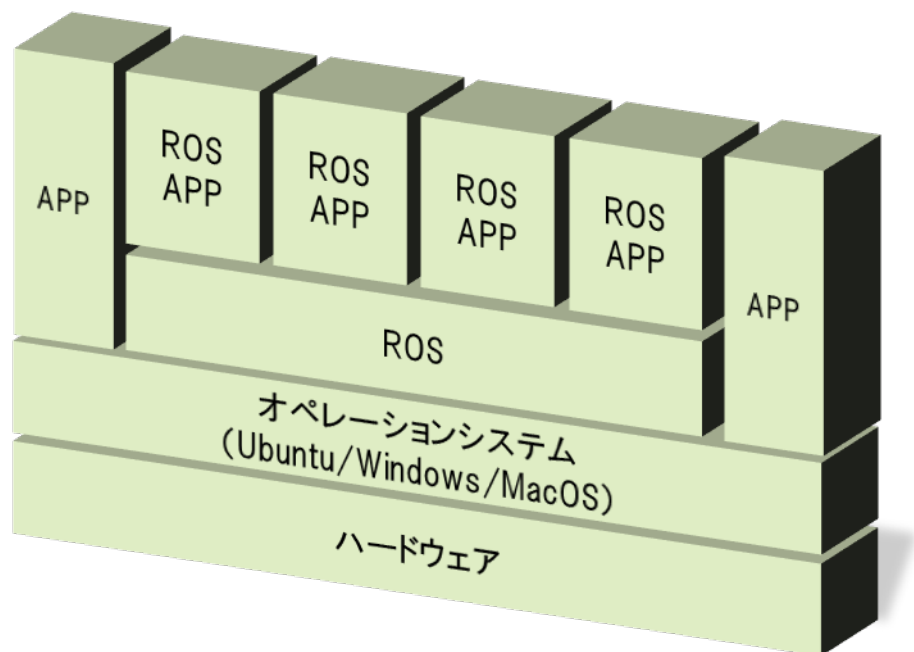


図 3.13 ROS の位置付け

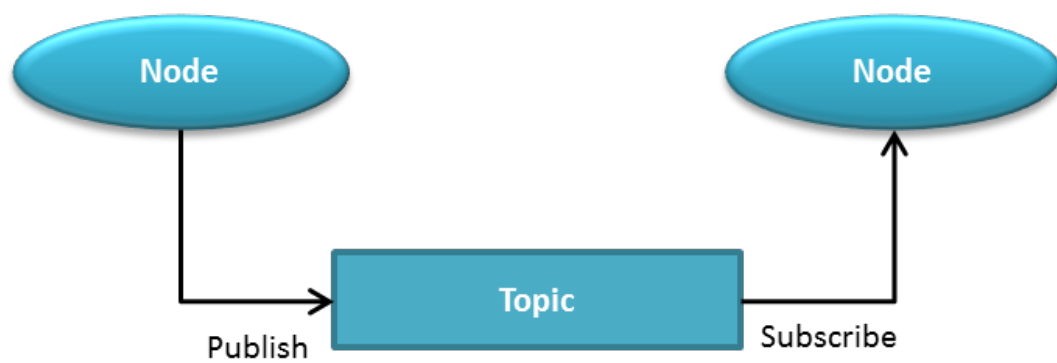


図 3.14 ノード間通信モデル

3.3.3 自己位置推定機能

自己位置推定機能として, Adaptive Monte Carlo Localization[22]を用いた. Adaptive Monte Carlo Localization は, Particle Filter を用いた Monte Carlo Localization を拡張した手法である. KLD-Sampling に基づいてパーティクル数を動的に調整し, 過去のセンサ値や運動モデルによる測定値を用いてパーティクル分布が実際のロボットの状態の分布に高い確率で収束するように処理することで, ロバストな位置推定を行うことができる. 動作モデルには, 車輪の回転角度の計算から, 各車輪の移動量を求め, その累積計算からロボットの位置を推定するオドメトリを採用した, 計測モデルには 2D-LRF のデータに基づく尤度場を採用した.

3.3.4 大域的経路生成機能

大域的経路生成機能の手法として, Dijkstra's Algorithm を用いた. Dijkstra's Algorithm とは, グラフ理論における最短経路探索アルゴリズムの中で最も古典的な手法のひとつであり, ロボットの経路生成だけでなく, カーナビの経路生成や鉄道の経路案内, インターネットルーティングプロトコルなど幅広く使われている手法である. アルゴリズムは, 有向グラフのスタートノードからゴールノードへの最短経路を求める方法をとっている. スタートノードから徐々に探索するノードを拡大させていきながら各ノードにおける最小コストを更新していき, ゴールノードについたときにその最小コストを実現するようなパスの選択を行う. 経路コストが一意であるときは, 他の代表的な大域的な経路生成手法である最良優先探索法や A* アルゴリズムと比較して, 少ない計算量で経路を求められる利点がある.

3.3.5 局所的経路生成機能

局所的経路生成機能として, Dynamic Window Approach を用いた. Dynamic Window Approach は, ロボットの運動モデルを考慮した経路生成手法である. まず, センサから得られた情報を元に, ロボットのダイナミクスを考慮して, 実行可能な複数の局所的経路候補の生成を行う. そして, 評価関数により大域的経路に近く, かつ障害物から離れた局所的経路の動作の選択を行う. 特徴として, 高速な計算処理が可能であること, 車体モデルを導入できること, パラメータのチューニングがしやすいこと, などが挙げられる.

3.3.6 大域的経路生成機能

大域地図生成機能として, 自己位置推定と地図生成を同時に行う SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 手法の一つである Rao-Blackwellized Particle Filter[23] を用いた Grid based SLAM を用いた. 自己位置の軌跡を通常の Particle Filter で, 地図の 2D 占有格子地図で表現して, Binary Bayes Filter で推定するアルゴリズムである. 動作モデルにはオドメトリを使用し, Particle Filter の計測モデルには, 2D-LRF のデータを使用している.

3.3.7 局所的地図生成機能

RealsenseD435 を用いた緑化領域抽出機能による情報と 2D-LRF 情報の統合データを用いて局所地図生成を行った。図 3.15 に局所地図生成までの処理手順を、図 3.16 に統合イメージデータを示す。統合を行う為には緑化領域抽出機能による情報を変換する必要がある。これは、2D-LRF と統合する上で、情報の型を揃える必要がある為である。変換には、RGB-D カメラから得られたカラー画像・赤外線画像を基に生成した緑化領域抽出画像、及び距離画像を使用する。以下、変換手順を述べる。

まず、抽出した緑化領域(緑化領域抽出画像上)に対応する座標以外の距離情報(距離画像上)を 0 に変換する。これにより、RealsenseD435 から緑化領域までの距離情報のみを持った距離画像が取得される。次に、2D-LRF から送信されるデータは一次元配列であるため、統合する為には緑化領域までの距離情報を持った画像を一次元配列に格納し直す必要がある。そこで、depthimage_to_laserscan ライブラリ[24]を使用し、画像情報を一次元配列に格納し直した。加えて、RealsenseD435 の設置角度を考慮した距離補正を行う事で RGB-D カメラからの距離情報を、移動ロボットからの距離情報に変換する。RealsenseD435 の水平方向分解能は 2D-LRF の角度分解能よりも小さい為、2D-LRF の角度分解能(0.25°)に合わせた配列数に変換した。最後に、用意した統合用の 1 次元配列 (720 ピクセル) に RealsenseD435 と 2D-LRF の情報を格納する。このよう統合した情報を使用して作成した局所地図は RealsenseD435 によって抽出した緑化領域と、2D-LRF によって広範囲の背の高い障害物を反映させる。図 3.17 は RealsenseD435 と 2D-LRF の情報を反映させた局所地図、比較用に図 3.18 に 2D-LRF の情報のみを反映させた局所地図を示す。局所地図上に反映された障害物はロボットの内接円半径以上の大きさで膨張させている。図 3.17 の緑線、及び図 3.18 の赤線は実際に局所地図に反映された障害物情報を基に生成した移動ロボットの経路である。図 3.19 は生成した経路を実世界に仮想的に反映した図である。

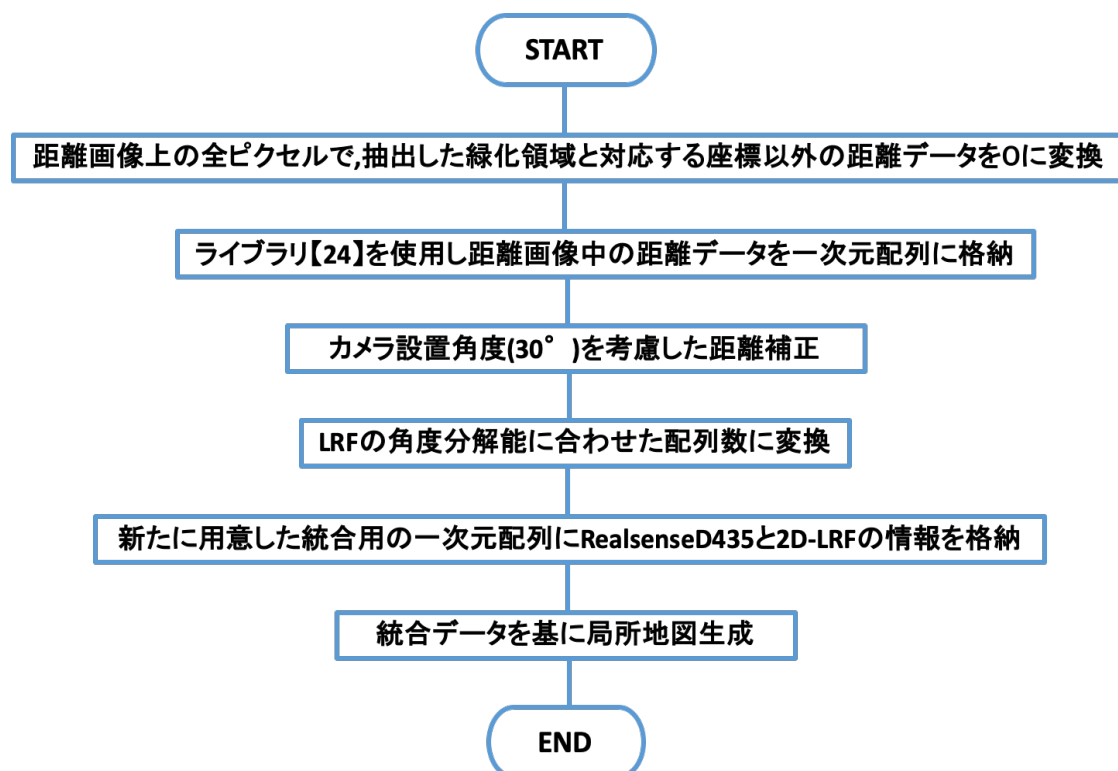


図 3.15 局所地図生成までのフローチャート

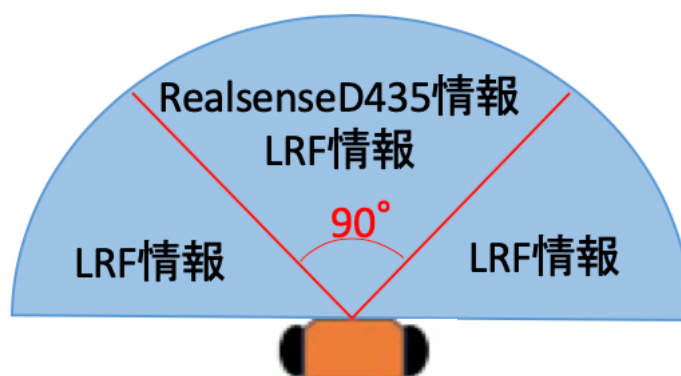


図 3.16 統合イメージデータ

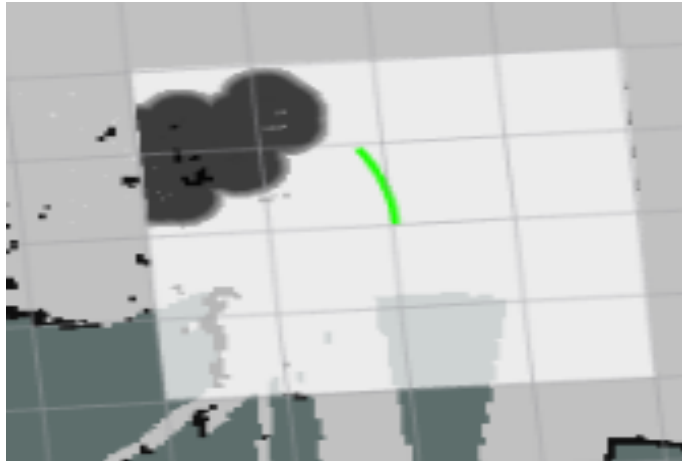


図 3.17 局所地図(RealsenseD435&2D-LRF)

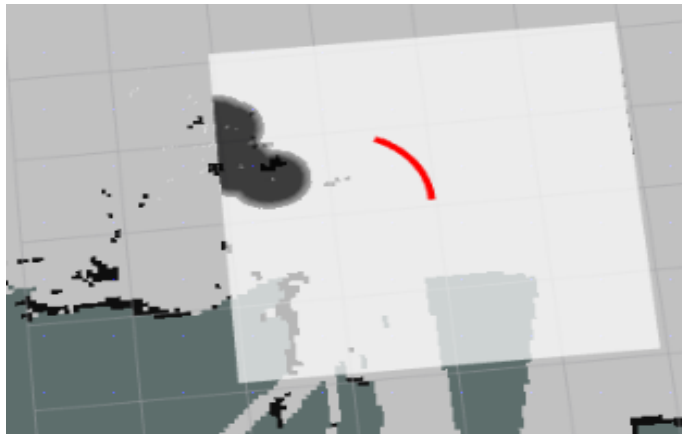


図 3.18 局所地図(2D-LRF)



図 3.19 局所地図を基に生成した経路イメージ

第4章 予備実験

4.1 と 4.2,4.3 では緑化領域候補の抽出に必要な測定・評価を行った。

4.1 植生指標の検討(方法 A)

2.2.5 で述べた,植生指標の評価結果を示す.表 4.1 は植物特有の色の変化に頑強な植生指標か否か,の評価結果である.それぞれの植生指標で,黄色の芝生,緑色の芝生,落葉溜りを測定し,類似度を調べた.値が低いほど類似度も低い.表 4.2 は,影の有無で認識性能に影響が少ない植生指標か否か,の評価結果である.値が 0 に近いほど影響が少ない.これらの結果より,植物特有の色の変化に頑強な赤外青植生指標と,植物の色変化及び影の影響に耐性を持つ RBI を緑化領域候補の抽出に使用した。

表 4.1 植物特有の色の変化に頑強な植生指標か否かの評価結果

	黄色の芝生	緑色の芝生	落葉溜り
GEI	0.348	0.084	0.725
Grvi	0.199	0.841	-0.057
NDVI	0.276	-0.126	0.073
赤外青植生指標	-0.182	-0.222	-0.127
RBI	-0.071	-0.057	-0.074
色相	-0.106	-0.182	-0.026
彩度	-0.098	0.474	-0.183

表 4.2 影の有無で認識性能に影響がない植生指標か否かの評価結果

	黄色の芝生	緑色の芝生	落葉溜り
GEI	0.049	1.756	2.244
Grvi	1.171	5.171	15.171
NDVI	19.22	11.366	1.317
赤外青植生指標	22.78	17.78	24.341
RBI	3.317	6.805	22.878
色相	1.244	7.805	94.683
彩度	11.073	20.585	60.317

4.2 緑化領域候補抽出に用いる閾値の決定(方法 A)

2.2.6 で述べた上限・下限閾値の決定方法について述べる.黄色の緑化領域,緑色の緑化領域,茶色の緑化領域それぞれから求めた画素の最小値の平均,最大値の平均を表 4.3 に示す.表 4.3 に示す各領域の平均より求めた,赤外青植生指標と RBI の上限・下限閾値の基になる値は表 4.4 のようになった.そこで,本研究では表 4.4 の結果を基に赤外青植生指標の下限値を 148,上限値を 166 に設定.RBI の下限値を 145,上限値を 160 に設定した.RBI は赤外青植生指標よりもアスファルトと緑化領域の類似度が高い為,下限閾値を高め,上限閾値を低めに設定している.

表 4.3 各領域の画素の最小値の平均及び最大値の平均(方法 A)

	黄色い緑化領域		緑色の緑化領域		茶色の緑化領域	
	最小値の平均	最大値の平均	最小値の平均	最大値の平均	最小値の平均	最大値の平均
赤外青植生指標	139	165	133	169	117	149
RBI	144	158	132	153	125	145

表 4.4 赤外青植生指標と RBI の上限・下限閾値の基になる値(方法 A)

	各領域の平均(最小値)	各領域の平均(最大値)
赤外青植生指標	130	161
RBI	134	152

4.3 緑化領域候補抽出に用いる輝度値の取りうる範囲の決定(方法 B)

2.3.3 で用いた 2 本の青線(緑化領域を撮影して得られる輝度値の取りうる範囲)の決定方法について述べる.決定方法は 2.2.6 で説明した上限・下限閾値の決定方法と同様である.用いた画像は黄色の緑化領域を撮影した赤外線画像,緑色の緑化領域を撮影した赤外線画像,茶色の緑化領域を撮影した赤外線画像をそれぞれ複数枚用いた.表 4.5 は各領域の画素の最小値の平均及び最大値の平均である.表 4.6 は各領域で求めた最小値の平均の平均と最大値の平均の平均である.表 4.6 の結果を基に青線をそれぞれ 70 と 180 に設定した.

表 4.5 各領域の画素の最小値の平均及び最大値の平均(方法 A)

	黄色い緑化領域		緑色の緑化領域		茶色の緑化領域	
	最小値の平均	最大値の平均	最小値の平均	最大値の平均	最小値の平均	最大値の平均
赤外線画像	92	161	82	147	69	168

表 4.6 2 本の青線の基となる値(方法 B)

	各領域の平均(最小値)	各領域の平均(最大値)
赤外線画像	81	180

4.4 緑化領域候補の統合

方法 A 及び方法 B を用いて抽出した緑化領域候補を示す.図 4.2 は方法 A で RBI を用いて抽出した緑化領域候補画像,図 4.3 は赤外青植生指標を用いて抽出した緑化領域候補画像である.図 4.4 は方法 B で抽出した緑化領域候補画像である.白い領域が抽出した緑化領域候補を示す.図 4.1 は参考の為に抽出を行った領域のカラー画像を示す.



図 4.1 抽出を行ったカラー画像

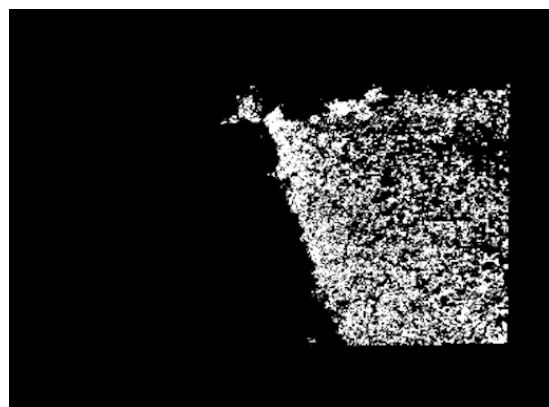


図 4.2 緑化領域候補(RBI 使用)

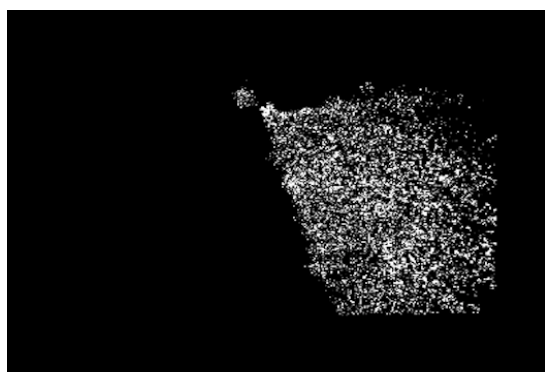


図 4.3 緑化領域候補(赤外青植生指標使用)

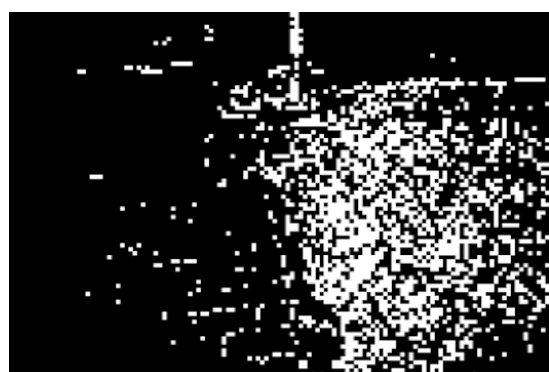


図 4.4 緑化領域候補(輝度値分布使用)

本研究では,方法 A と方法 B で抽出した緑化領域候補を統合して,緑化領域を抽出する為に,以下のような前処理を行う.方法 A について,RBI と赤外青植生指標を用いて取得した緑化領域候補画像同士の同一座標で OR 演算を行った.その後,取得した画像にノイズ除去を行う.図 4.5 に結果画像を示す.次に方法 B について,図 4.4 に示した画像にノイズ除去を行い,図 4.6 のような画像を取得した.このように,取得した図 4.5 と図 4.6 の画像同士の同一座標で AND 演算を行い,方法 A と方法 B それぞれで抽出した緑化領域候補を統合,緑化領域の抽出を行った.実際に抽出した緑化領域の画像を図 4.7 に示す.緑色の領域が抽出した緑化領域を示す.



図 4.5 ノイズ除去後緑化領域候補(方法 A) 図 4.6 ノイズ除去後緑化領域候補(方法 B)

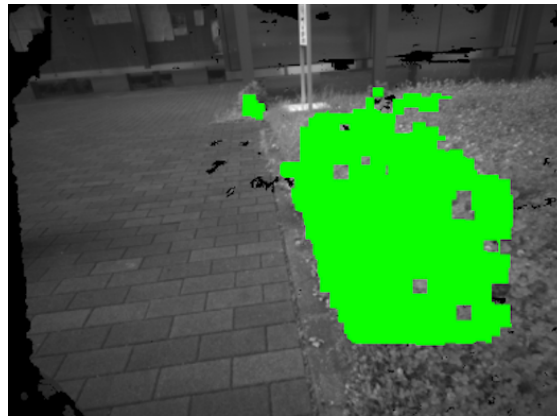


図 4.7 緑化領域抽出画像(統合結果)

第5章 実験

5.1 では開発した緑化領域抽出機能の性能評価について,5.2 では開発した抽出機能を実装した移動ロボットによる屋外走行実験について述べる.

5.1 緑化領域抽出機能の性能評価

開発した緑化領域抽出機能の性能を評価する為,抽出機能の認識率・誤認識率の測定及び,平均処理速度の測定を行った.

5.1.1 認識率・誤認識率

実験目的

RSC には様々な事物が存在する.その中でも,走行路であるアスファルトはカメラに映り込み,緑化領域抽出機能の処理対象となることが多い.また,季節を通して作業する移動ロボットには植物特有の色の変化に関係なく,緑化領域を抽出する機能が必要である.そこで,本研究では様々な色の緑化領域に対する認識率,アスファルトに対する誤認識率を調べた.

実験内容

認識率・誤認識率を調べる為,図 5.1 に示す 20 枚の画像を用意した.画像は閾値決定で使った画像は使用していない.また,用意した画像中の緑化領域は黄色や緑色,茶色など様々な色をとる.本研究では,用意した画像中から人手で緑化領域を切り出し,切り出した領域で,どの程度,提案機能を用いて抽出出来ているか調べる.同様に,画像中からアスファルトを人手で切り出し,切り出した領域で,どの程度,緑化領域と誤認識しているか調べた.切り出した領域は影の有無でも分けている.これは,RSC で建物の影響により影で覆われる領域が存在することを想定している.図 5.1 の緑線で囲まれた領域は陽の当たる緑化領域,赤線で囲まれた領域は陽の当たるアスファルト領域,橙色で囲まれた領域は日陰の緑化領域,紫色は日陰のアスファルト領域である.また,認識率・誤認識率は式(7)を用いて求めた.結果を表 5.1,表 5.2 にまとめる.

$$\text{認識率} \cdot \text{誤認識率} = \frac{\text{緑化領域と抽出した領域の画素数}}{\text{人手で切り出した領域の画素数}} \quad (7)$$

表 5.1 緑化領域の認識率

	陽のあたる領域	日影の領域
緑化領域	73.44%	62.89%

表 5.2 アスファルト領域の誤認識率

	陽のあたる領域	日影の領域
アスファルト領域	0.27%	0.53%



(a) 評価対象 1



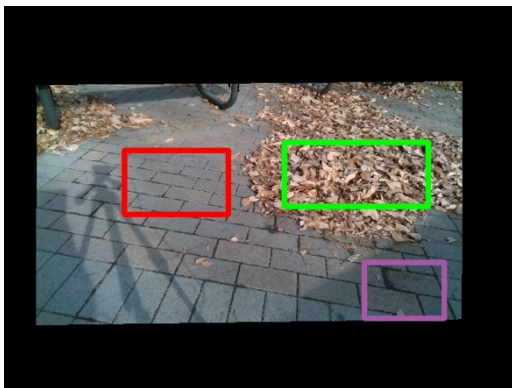
(b) 評価対象 2



(c) 評価対象 3



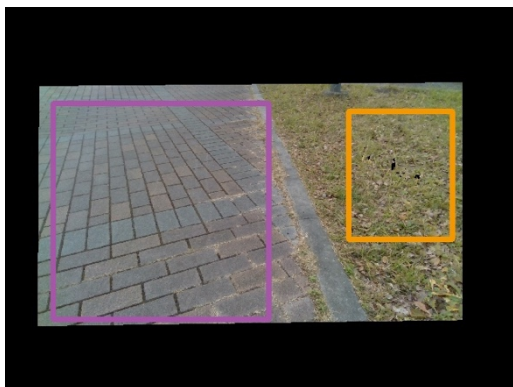
(d) 評価対象 4



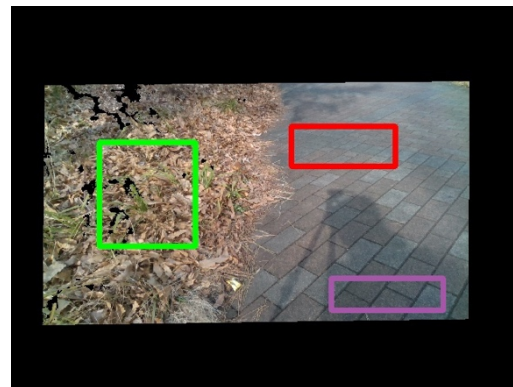
(e) 評価対象 5



(f) 評価対象 6



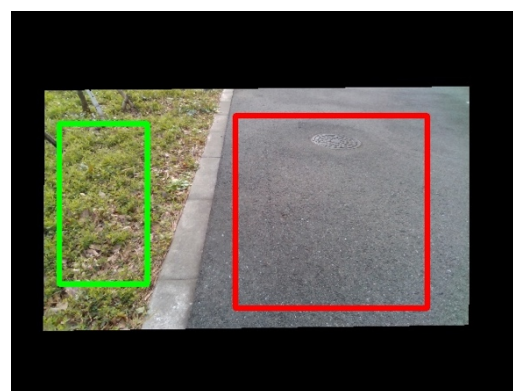
(g)評価対象 7



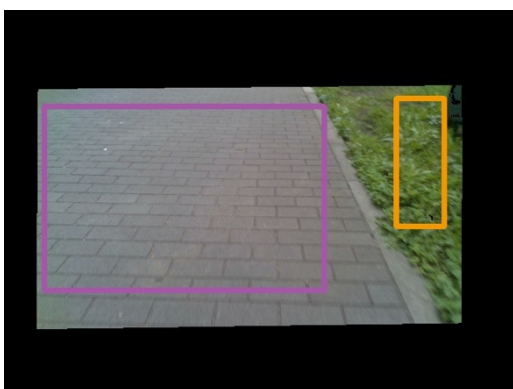
(h)評価対象 8



(i)評価対象 9



(j)評価対象 10



(k)評価対象 11



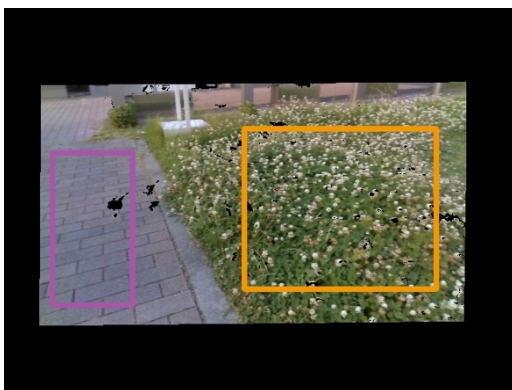
(l)評価対象 12



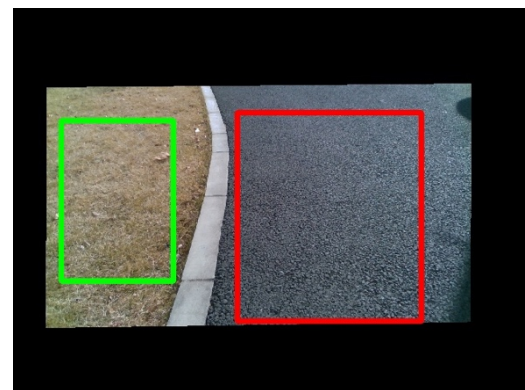
(m)評価対象 13



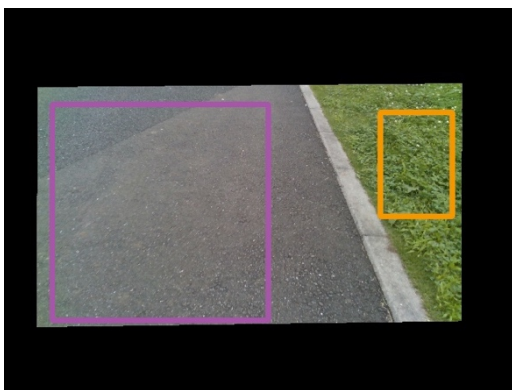
(n)評価対象 14



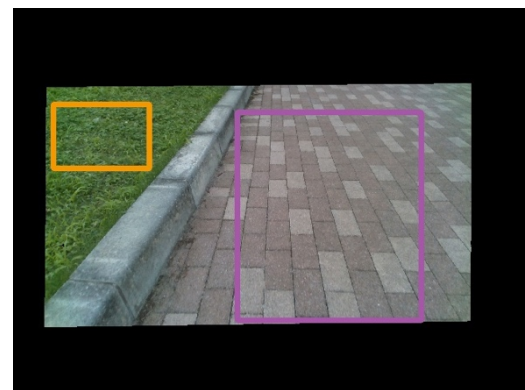
(o)評価対象 15



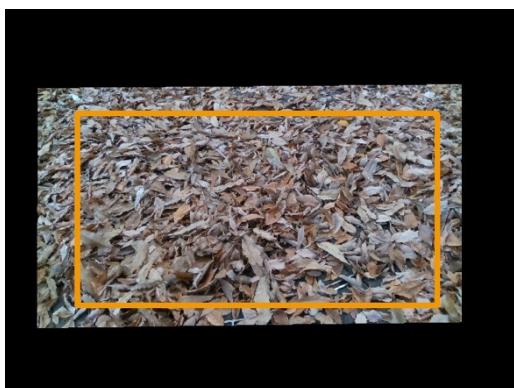
(p)評価対象 16



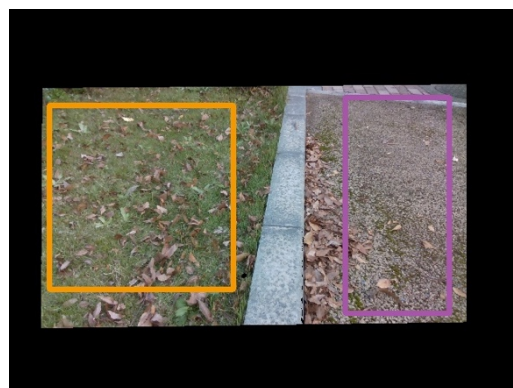
(q)評価対象 17



(r)評価対象 18



(s)評価対象 19

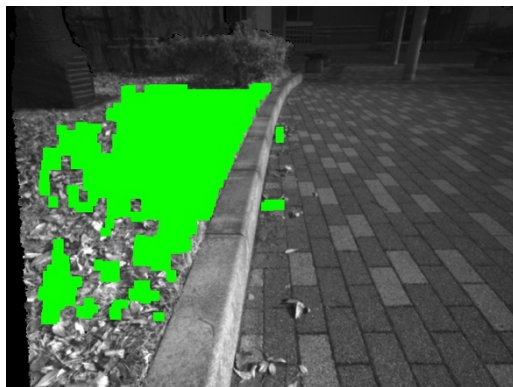


(t)評価対象 20

図 5.1 評価を行う対象領域を撮影したカラー画像



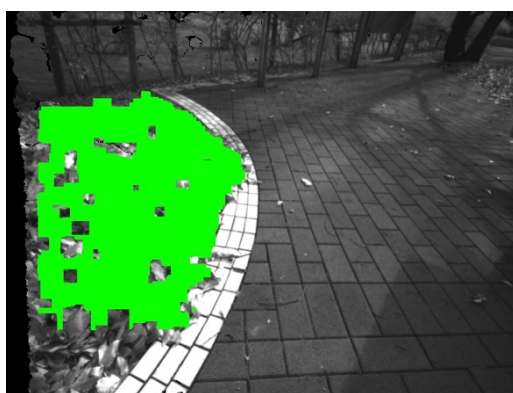
(a) 抽出結果 1



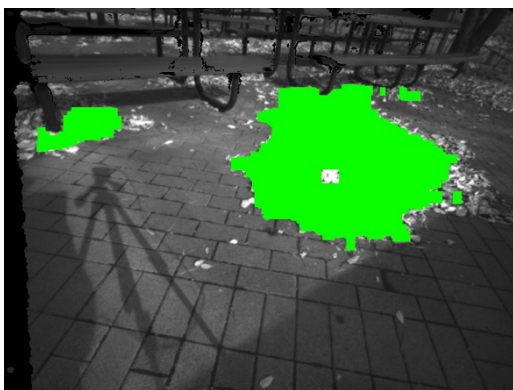
(b) 抽出結果 2



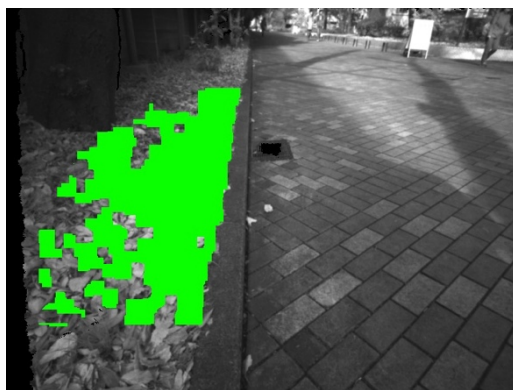
(c) 抽出結果 3



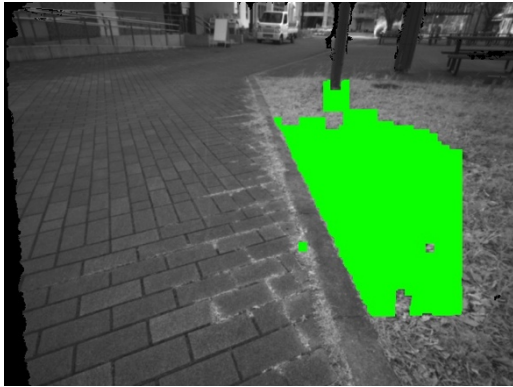
(d) 抽出結果 4



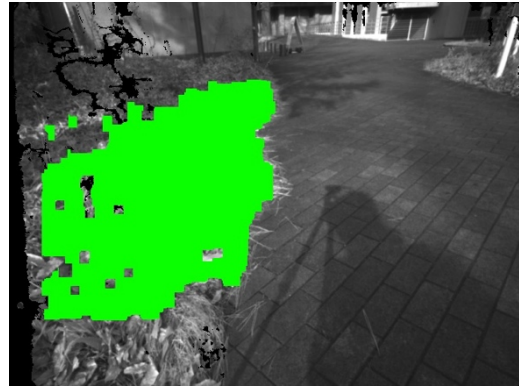
(e) 抽出結果 5



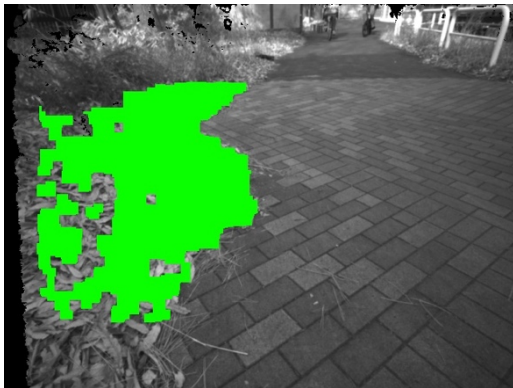
(f) 抽出結果 6



(g) 抽出結果 7



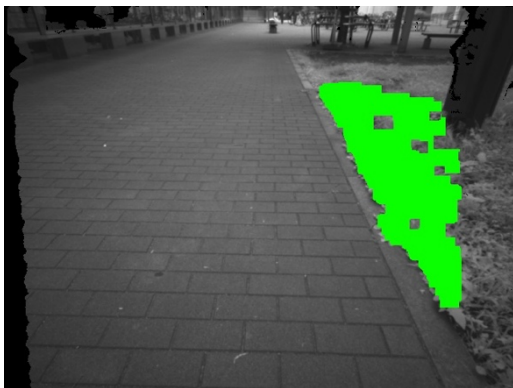
(h) 抽出結果 8



(i) 抽出結果 9



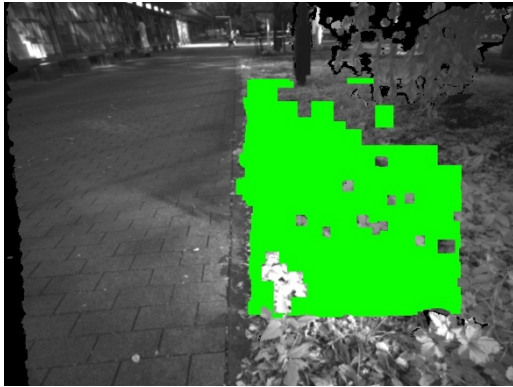
(j) 抽出結果 10



(k) 抽出結果 11



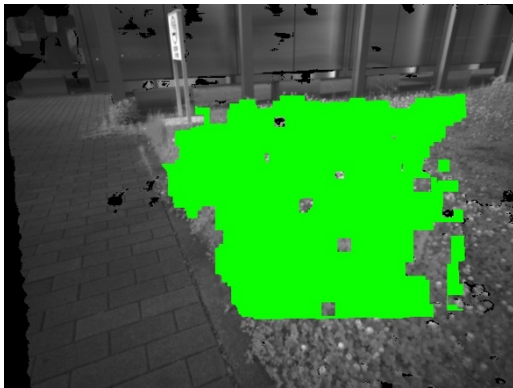
(l) 抽出結果 12



(m) 抽出結果 13



(n) 抽出結果 14



(o) 抽出結果 15



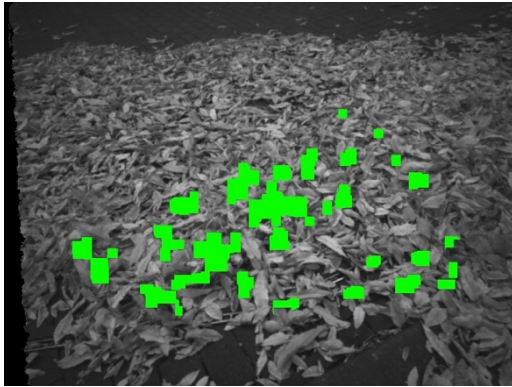
(p) 抽出結果 16



(q) 抽出結果 17



(r) 抽出結果 18



(s) 抽出結果 19



(t) 抽出結果 20

図 5.2 評価を行った領域の抽出結果

考察

抽出した緑化領域を移動ロボットに与える局所地図に反映させる際、ロボットの内接円以上の大きさで膨張させる。この膨張処理により、およそ 6 割以上緑化領域を抽出できていれば移動ロボットは緑化領域に侵入しない経路を生成することが出来る。今回開発した緑化領域抽出機能は、黄色や緑色、茶色、これらの色が混在する緑化領域に対して、陽の当たる領域では 7 割強、日影の領域では 6 割強で抽出できている。また、図 5.2 からアスファルトと緑化領域の境目では上手く緑化領域を抽出できている一方で、緑化領域の中心部などは、上手く抽出できていない事があった。これは、RGB-D カメラの AWD(オートホワイトバランス)による影響だと考えられる。AWD とは、光源の影響で変化する被写体の色味をカメラ自身が自動で補正する機能である。今回、この補正により事前の測定で定めた緑化領域候補を抽出する為の閾値の範囲から緑化領域の測定により得られた輝度値が外れてしまい認識できなかったと考えられる。しかし、緑化領域に侵入しない為には、走行路との境目付近の緑化領域の情報が重要となる為、影響が少ない。これらの結果より、本機能は植物特有の色変化に関わらず、移動ロボットが緑化領域を回避する為の緑化領域抽出を行う事が可能であると言える。続いて、誤認識率について述べる。走行路を誤認識してしまうと、ロボットの経路生成に影響を与える。今回、誤認識率は影の有無に関わらず 0.5%程度以下とロボットが走行するにあたり問題ない値であることを確認できた。誤認識してしまった領域として、落葉が数枚落ちている箇所を落葉溜まりと認識してしまったと思われる。落葉は移動ロボットが踏んでもほとんど影響がないので認識はすべきでない。対策として、ラベリング処理を用いて面積情報を取得し、落葉と落葉溜まりを分類することが考えられる。これにより、誤認識率をさらに抑えることが可能となる。

これらの結果より、開発した機能は植物特有の色の变化に頑強、低い誤認識率、な緑化領域抽出機能であると言える。

5.1.2 緑化領域抽出機能の平均処理速度

2.4 で述べたように方法 B に GPU を用いた並列処理を導入した。その結果、方法 A による緑化領域候補抽出機能と方法 B による緑化領域抽出機能を組み合わせた緑化領域抽出機能の平均処理速度は 15.6msec/frame となり、CPU のみで逐次的に処理した場合と比較して、8.64 倍の高速化を実現する事が出来た。これは 30fps を十分に超える処理速度であり、リアルタイムな処理(低計算コスト)を行うことができた。

5.2 屋外走行実験

5.2.1 大域的地図作成

大域地図生成機能を用いて、屋外の地図生成を行った。グリットの大きさを 50mm×50mm で作製した地図を図 5.3 に示す。黒く塗りつぶされた箇所が障害物存在領域を示す。大域的地図では走行した経路周辺の建物の壁やくぼみを問題なく認識することができる。Google Map の画像と比較しても問題なく作成できているため、信頼性の高い地図を作成することができた。これらの地図を事前に移動ロボットに与えて自律走行を行う。

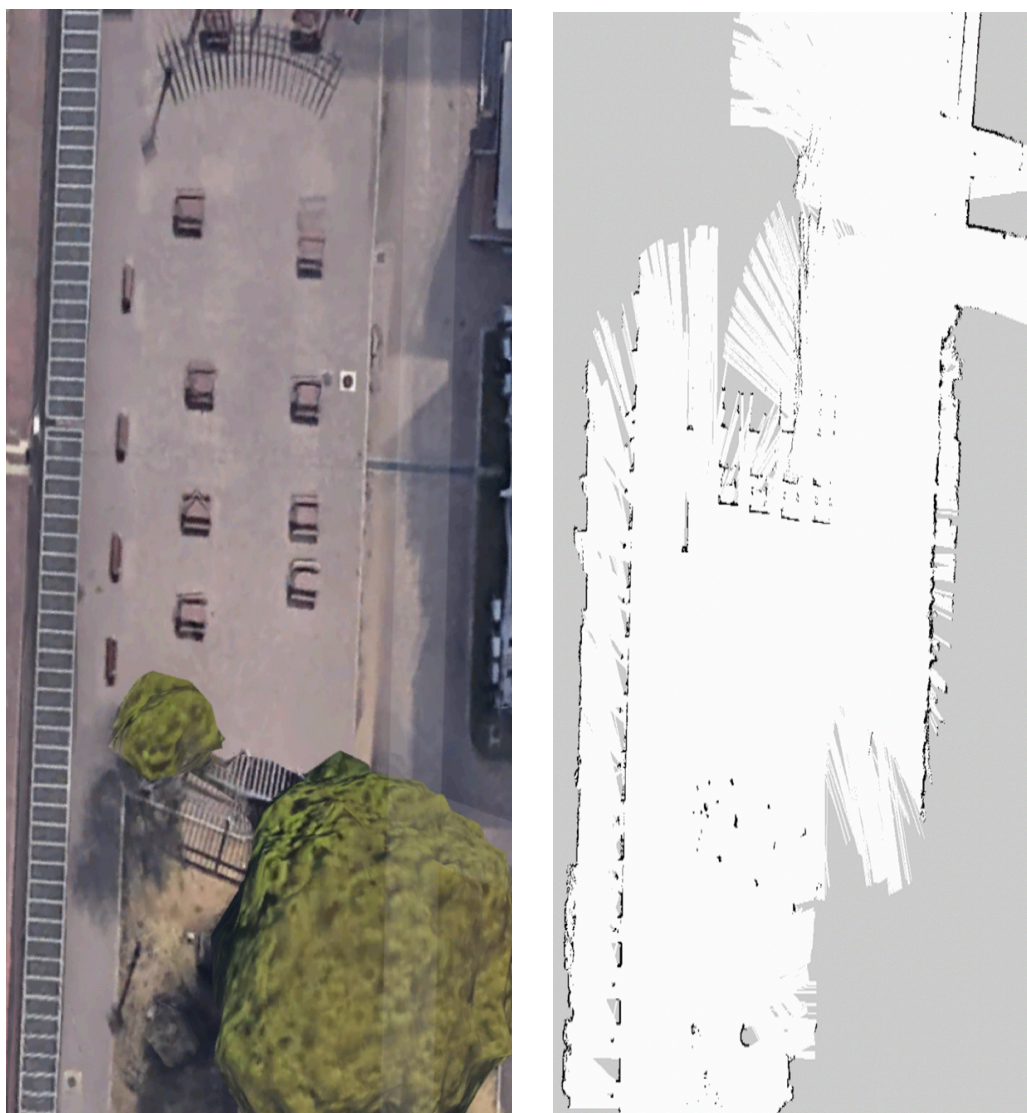


図 5.3 作成した大域地図（左図: Google Map 右図: 作成地図）

5.2.2 屋外走行

本機能を実装した移動ロボットで屋外を走行し、緑化領域と似た性質を持つ事物などが存在する環境でも、本稿が提案したシステムが緑化領域以外を誤認識しないか、確認した。図 5.4 は事前に与えている情報を反映した図である。スタート地点からゴール地点までは約 80m の経路で、ロボットの移動速度は、最高速度 400mm/s で行った。途中、ロボットが乗り越えられない高さの段差を回避する為、経由点を設定している。以下に事前にロボットに与えた情報と走行路周辺に存在した事物の例をまとめる。

- ・事前に与えている情報

- 大域的地図
- スタート地点座標
- ゴール地点座標
- 経由点座標(段差乗り越えの為)

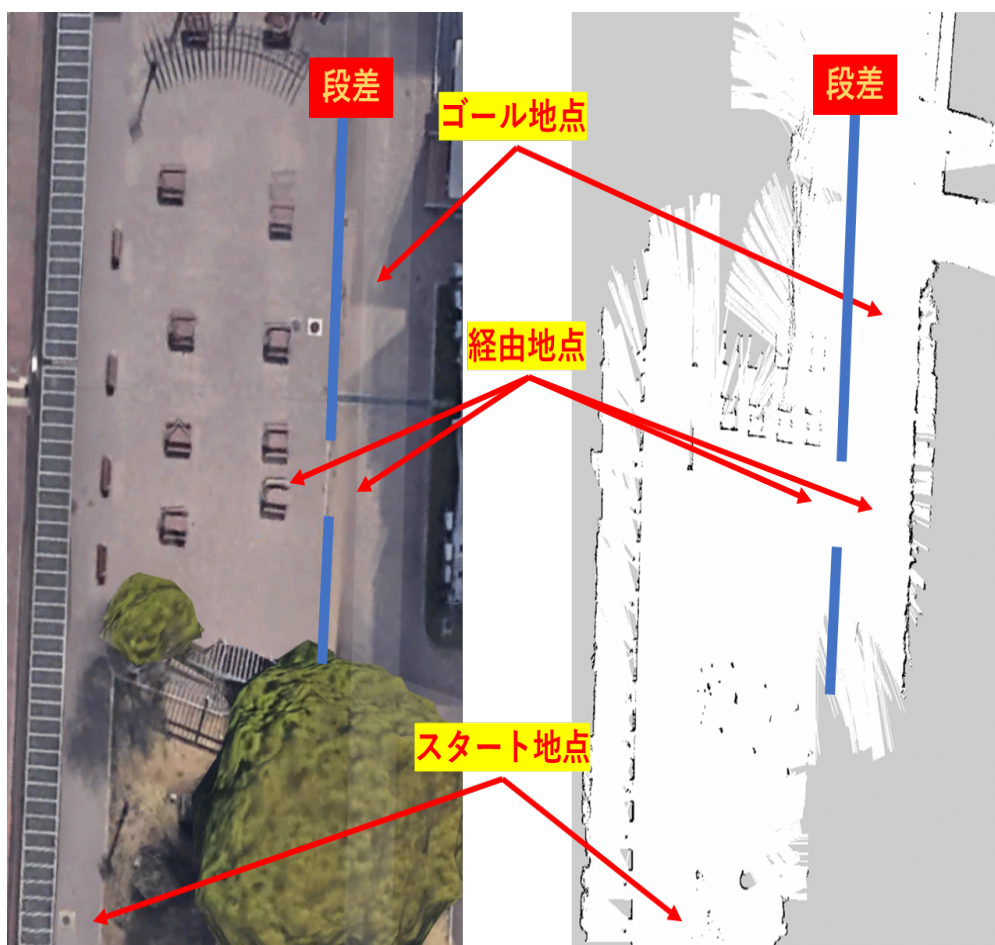


図 5.4 電気通信大学東地区 (左図: Google Map 右図: 作成地図)

・ 走行路周辺の事物

- ダンボール紙(図 5.5(a))
- 緑の養生テープ(図 5.5(b))
- ベンチ(図 5.5(c))
- グレーチング(図 5.5(d))
- 自転車
- マンホール など



(a) ダンボール紙



(b) 緑の養生テープ



(c) ベンチ



(d) グレーチング

図 5.5 走行路周辺に存在した事物の例

・走行中の様子を以下に示す.緑化領域抽出画像上での緑色で塗りつぶされた領域は抽出した緑化領域を示す.

図 5.6 にスタート地点での様子(緑化領域有り)

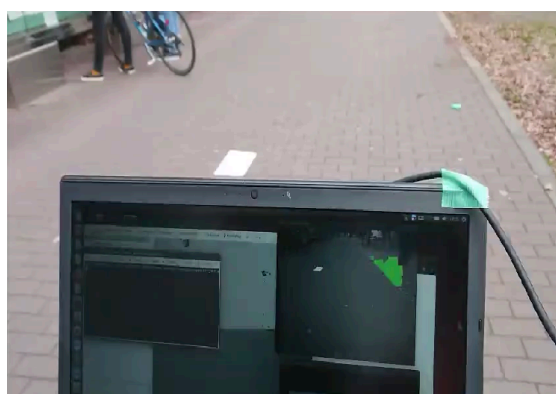
図 5.7 にダンボール紙・緑の養生テープ・自転車が画面に映り込んだ様子(緑化領域有り)

図 5.8 ベンチが画面に映り込んだ様子(緑化領域なし)

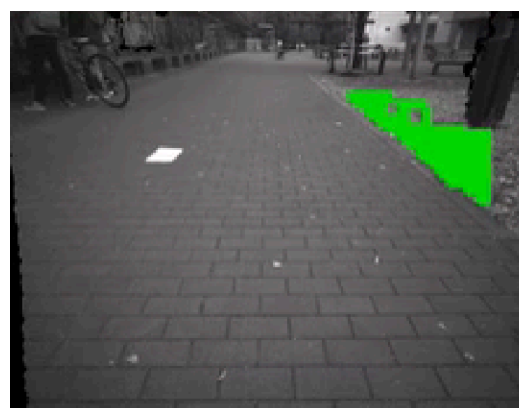
図 5.9 ロボットが段差を乗り越える・歩行者が画面に映り込んだ様子(緑化領域なし)

図 5.10 にグレーチングが画面に映り込んだ様子(緑化領域なし)

図 5.11 ゴール地点でマンホールが画面に映り込んだ様子(緑化領域なし)



(a) ロボット上部に設置したカメラ映像

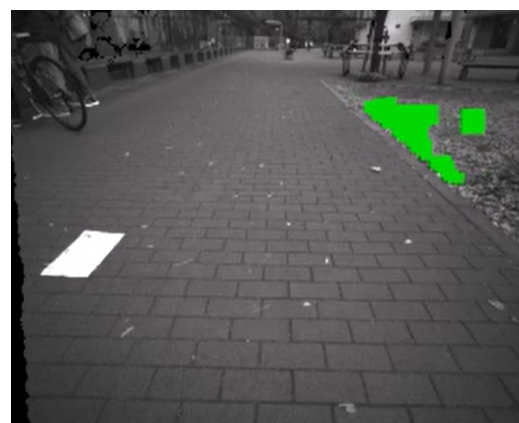


(b) 緑化領域抽出画像

図 5.6 スタート地点での様子

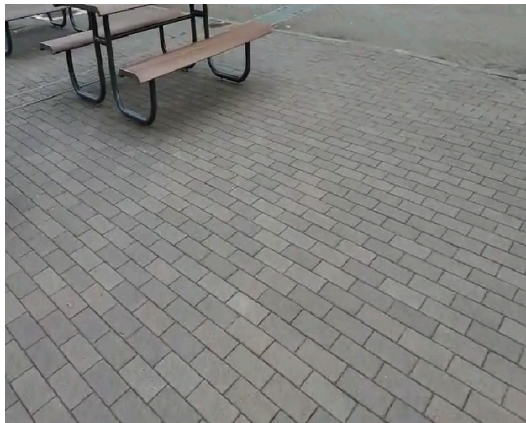


(a) ロボット上部に設置したカメラ映像



(b) 緑化領域抽出画像

図 5.7 ダンボール紙・緑の養生テープ・自転車が画面に映り込んだ様子

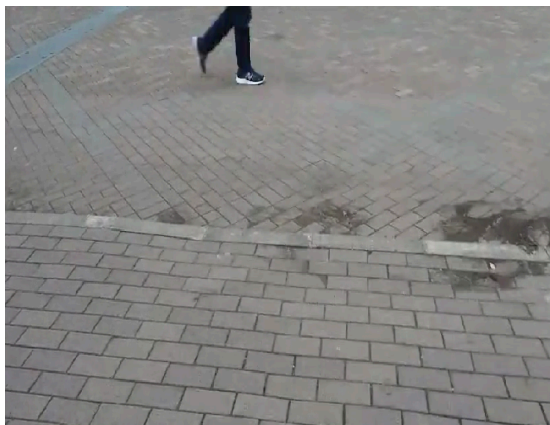


(a) ロボット上部に設置したカメラ映像



(b) 緑化領域抽出画像

図 5.8 ベンチが画面に映り込んだ様子



(a) ロボット上部に設置したカメラ映像



(b) 緑化領域抽出画像

図 5.9 ロボットが段差を乗り越える・歩行者が画面に映り込んだ様子



(a) ロボット上部に設置したカメラ映像



(b) 緑化領域抽出画像

図 5.10 グレーチングが画面に映り込んだ様子



(a) ロボット上部に設置したカメラ映像



(b) 緑化領域抽出画像

図 5.11 ゴール地点でマンホールが画面に映り込んだ様子

走行軌跡は以下の図に示す通りである。

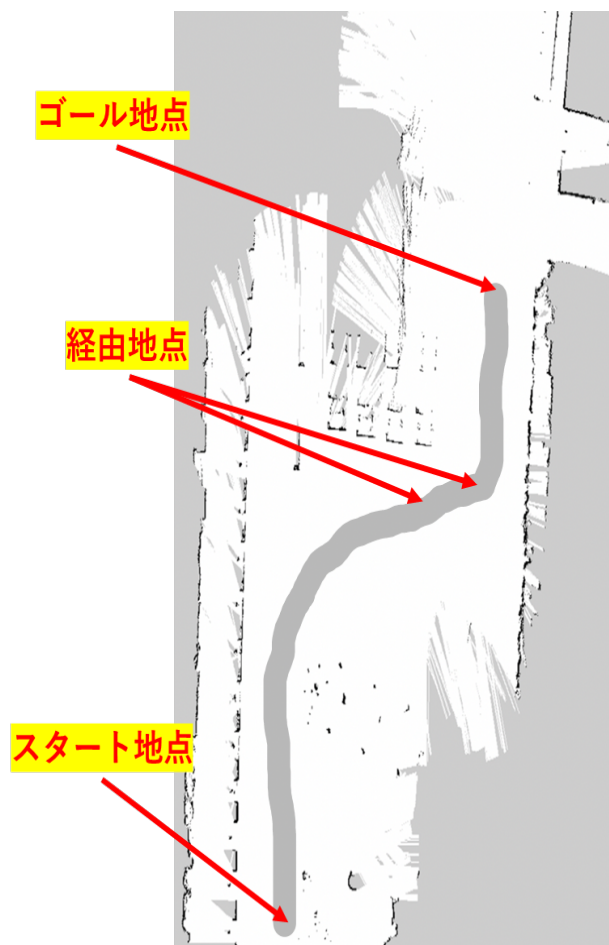


図 5.12 移動ロボットの走行軌跡

考察

図 5.6 及び図 5.7 から見て取れるようにスタート地点付近でのロボットから見て右手には緑色の植生と落葉溜りが混在する緑化領域が存在していたが、移動ロボットに実装した緑化領域抽出機能で 5.1 節での性能評価通り緑化領域の大部分を抽出が行える事を確認した。また、図 5.7 に示す走行路面上には自転車やダンボール紙、緑の養生テープが存在した。自転車の素材であるアルミなど金属光沢を持つ事物は光を反射する角度によっては緑化領域と同様に赤外線受光強度が高い、緑の養生テープは緑化領域と同様に緑色である。これらの緑化領域と似た性質を持つ事物に対しても、緑化領域特有の性質を利用した本抽出機能で緑化領域以外を誤認識、誤認識によるロボットの急激な進路変更は確認されなかった。また、図 5.8~図 5.11 に示す走行路面上には RSC に存在する頻度の高いベンチやグレーチング、マンホール、図 5.9 には歩行者が存在した。前述のような、本研究で対象とする RSC を想定した環境で緑化領域抽出機能を実装した移動ロボットを用いて走行実験を行い、植物の色変化に関わらず緑化領域を抽出できること、緑化領域と似た性質、RSC に多く存在する事物であっても誤認識しないことを確認し、本研究の有用性を示した。

第6章 まとめ

6.1 結言

本論文の成果は以下の通りである.

- 4) 本研究で設定した赤外青植生指標と既存の植生指標である RBI を組み合わせた方法 A,及び近赤外波長帯域の輝度値分布を使用した方法 B を組み合わせ,“低計算コスト・低い誤認識率・植物特有の色変化に頑強”といった要求仕様を満たす RSC に適した緑化領域抽出手法を提案した
- 5) 開発した機能と 2D-LRF による情報を反映した局所地図を生成,緑化領域を避ける経路を生成することを確認した
- 6) 屋外走行実験による RSC を想定した様々な事物がある環境で走行を行い,本研究の提案するシステムの有用性を示した

6.2 今後の課題

- ・対象者の速度を認識し,それに合わせた道案内システムの開発
 - ・人に不快感や恐怖感を与えない経路生成システムの開発
 - ・走行路面周辺に存在する様々な路面特徴量の抽出・分類
- などが今後の課題として挙げられる.

参考文献

- [1] 総務省 HP 平成 28 年度版情報通信白書 特集「IoT・ビッグデータ・AI～ネットワークとデータが創造する新たな価値～」.
- [2] 総務省統計局 労働力調査年報 (2016 年) .
- [3] NEDO 「2035 年に向けたロボット産業の将来市場予測①」.
- [4] SoftBank 公式 HP.
<https://www.softbank.jp/biz/robot/rs26/>
- [5] 株式会社 ロボリューション 公式 HP.
http://robot-revolution.com/exevi?VIPROG=wn_view&DOMAIN=robot-revolution.com&LANGUAGE=japanese&FILENAME=79828899894359529.dat&PAGE=user_news.htm
- [6] SoftBank 公式 HP.
<https://www.softbank.jp/>
- [7] 地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター 公式 HP.
<https://tiri-robot.jp/news/17110101.html>
- [8] 松本効己, 四役勝輝, 金森哉吏: 周辺環境認識機能を加えた作業計画ナビゲーションの高度化; [No.180-1] 一般社団法人日本機械学会関東支部第 24 期総会・講演会講演論文集, OS0418, [2018.3.17-18]. 日本機械学会関東支部第 24 期講演会若手優秀講演賞受賞 (2018/04/24)
- [9] K.Tobita, K.Matsumoto, S.Yotsuyaku and C.Kanamori; Principle and Robotic Applications of Conical Scanning Method, The 9th TSME International Conference on Mechanical Engineering, 11-14 December 2018, Phuket, Thailand. Paper ID: ICOME-2018-0223, DRC0007
- [10] 松崎燦心, 山崎公俊, 原祥堯, 堀内孝司: 人手による指示経路の学習に基づく移動ロボットの妥当な走行領域の推定; 第 20 回ロボティクスシンポジウム
- [11] Wurm, K: Improving Robot Navigation in Structured Outdoor Environments by Identifying Vegetation from Laser Data, The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (2009), pp. 1217-1222
- [12] 伊達央, 大川真弥, 滝田好宏, 菊池惇: 地表面の反射輝度を活用した自律移動ロボットの高精度自己位置推定, 日本機械学会論文集 (C 編) 79 巻 806 号 pp.3389-3398.
- [13] 都築康幸, 藤井壽生, 近田文弘: 正規化植生指標撮像装置による街路樹の成長判読, 日本大学生産工学部第 42 回学術講演会
- [14] シーシーエス株式会社 HP
https://www.ccs-inc.co.jp/guide/column/light_color/vol13.html

- [15] 王輝民,小島覚,近藤昭彦,劉瑛璟：中国チベット高原植生の NDVI 特性の研究, 写真測量とリモートセンシング, 2000 年 39 巻 2 号 p. 64-73
- [16]尾崎敬二：商用デジタルカメラから緑赤植生指標を得る簡便方法の提案, 第 79 回全国大会講演論文集 2017(1), p.529-530
- [17]尾崎敬二：ドローン搭載カメラによる可視光画像の植生領域判別に有効な指標, 第 80 回全国大会講演論文集 2018(1), p.9-10
- [18]尾崎敬二：小型無人航空機搭載デジタルカメラによる単一空撮可視光画像から推定する植生指標,日本画像学会誌(2018)57 巻 3 号 p.302-307
- [19] 多摩川精機 「レゾルバとは」.
- [20] 筑波大学知能ロボット研究室, 移動ロボットの行動プログラミング.
<http://openspur.org/~atsushi.w/jikken/task-3.html>
- [21] HOKUYO 北陽電機株式会社.
<http://www.hokuyo-aut.co.jp/>
- [22] D. Fox, “Adapting the sample size in particle filters through KLD-sampling”, International Journal of Robotics Research, Vol.22, No.12, pp.985-1004, 2003.
- [23] G. Grisetti, C. Stachniss and W. Burgard, “Improved techniques for grid mapping with Rao-Blackwellized particle filters”, IEEE Transactions on Robotics, Vol.23, No.1, pp.34-46, 2007
- [24]depthimage_to_laserscan
https://github.com/ros-perception/depthimage_to_laserscan

謝辞

本研究は電気通信大学大学院 機械知能システム学専攻 金森哉吏 准教授のご指導のもとに行われたものです。本研究室の准教授である金森哉吏には、懇切丁寧なご指導・ご鞭撻に多くの時間を割いていただき、心より深く感謝申し上げます。3 年間、先生からの温かい、ご助言及び適切なご指導により、本研究を完成することができました。また、本研究室のメンバーとは苦楽を共にし、充実した研究室生活を過ごすことが出来ました。深く感謝申し上げます。

最後に、著者のために大学 4 年間及び大学院 2 年間の学生生活を支えてくれた家族に心より感謝いたします。